

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Výrobní přesnost 3D tištěných modelů a porovnávání
mechanických vlastností tištěného materiálu**

Manufacturing Accuracy of 3D Printed Models and Comparing
of the Mechanical Properties of Printed Materials

Autor práce:

Jiří Olehla

Vedoucí práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Olehla**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Výrobní přesnost 3D tištěných modelů a porovnávání mechanických
vlastností tištěného materiálu
Manufacturing Accuracy of 3D Printed Models and Comparing of the
Mechanical Properties of Printed Materials
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky a současný stav.
3. Technologie výroby 3D tisku (druhy materiálu a jejich parametry pro tisk).
4. Návrh experimentu.
5. Měření přesnosti součástí a porovnání odchylek s 3D modelem.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, xxii, 459 p. ISBN 1441911200.
[2] Virta, Mikael. *The Capabilities of the Fused Deposition Modeling Machine Ultimakes and its Adjusting for the Bio-medical Research Purposes*. Master of Science Thesis. Examiner: Minna Kellomäko. 2013. 107 p. Faculty of Engineering Sciences. Tampere University of Technology.
[3] Internetové zdroje www.3d-tisk.cz, www.3dhubs.com, <http://www.thingiverse.com>, aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě16.5.2016.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠBTUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16.5.2016



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Olehla

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Rýmařovská 177

Břidličná 793 51

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

OLEHLA, J. *Výrobní přesnost 3D tištěných modelů a porovnání mechanických vlastností tištěného materiálu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 65s. Vedoucí práce: Pagáč, M.

Bakalářská práce se zabývá rozбором výrobní přesnosti 3D tištěných modelů a porovnávání mechanických vlastností tištěných materiálů. V úvodu je stručná definice pojmů aditivní výroby, její princip, základní rozdělení a popis vlastností používaných materiálů a jejich tiskových parametrů. Dále jsou popsány základní typy aditivní výroby a jejich vybrané technologie. V praktické části bakalářské práce je proveden popis postupu tvorby testovacích modelů, jejich následný tisk a hodnocení. V závěru práce jsou porovnány výsledky 3D tisku a zhodnocení přesnosti vybrané 3D tiskárny.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

OLEHLA, J. *Manufacturing Accuracy of 3D Printed Models and Comparing of the Mechanical Properties of Printed Materials: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2016, 65 p. Thesis head: Pagáč, M.

Bachelor thesis deals with analysis of manufacturing precision 3D printed models and the mechanical properties of printed materials. At the beginning is short definition of additive manufacturing, its principle, basic classification and description of the basic properties of materials used and their printing parameters. Below are the main types of additive manufacturing and selected technologies. In the practical part of my thesis describes the process of developing test models, their subsequent printing and evaluation. In conclusion, the thesis is to compare the print results and evaluate the accuracy of the selected 3D printer.

OBSAH:

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	7
ÚVOD.....	9
1. SEZNÁMENÍ S VÝROBNÍ TECHNOLOGIÍ ADITIVNÍ VÝROBY.....	10
1.1 ADITIVNÍ VÝROBA.....	10
1.2 TISKOVÉ MATERIÁLY	13
1.3 POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TIŠTĚNÝCH MATERIÁLŮ.....	19
2. KLASIFIKACE ADITIVNÍ VÝROBY DLE POUŽITÉ TECHNOLOGIE.....	20
2.1 TECHNOLOGIE NÁSTŘIKU POJIVA – BINDER JETTING.....	20
2.2 TECHNOLOGIE TRYSKÁNÍ MATERIÁLU – MATERIAL JETTING	21
2.3 TECHNOLOGIE EXTRUZE TERMOPLASTU – MATERIAL EXTRUZION.....	22
2.4 FOTOPOLYMERIZAČNÍ PROCESY – VAT PHOTOPOLYMERIZATION.....	23
2.5 SPOJOVÁNÍ PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ – POWDER BED FUSION	24
2.6 MÍŘENÉ NANÁŠENÍ MATERIÁLU – DIRECTED ENERGY DEPOSITION	25
2.7 PLOŠNÉ VRSTVENÍ MATERIÁLU – SHEET LAMINATION	26
3. REŠERŠE VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ.....	28
3.1 TECHNOLOGIE NÁSTŘIKU POJIVA	28
3.2 TECHNOLOGIE TRYSKÁNÍ MATERIÁLU.....	29
3.3 TECHNOLOGIE EXTRUZE MATERIÁLU	32
4. VÝROBNÍ PŘESNOST 3D MODELU	35
4.1 ZÁKLADNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST TISKU:.....	36
5. EXPERIMENT.....	37
5.1 PROCES TVORBY TESTOVACÍHO MODELU	37
5.2 TISK MODELŮ A HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	42
6. MĚŘENÍ VÝROBNÍ PŘESNOSTI TIŠTĚNÝCH MODELŮ.....	50
ZÁVĚR.....	57
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM TABULEK.....	64
SEZNAM PŘÍLOH.....	65

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Význam	Jednotka
2D	Dvou rozměrný prostor	
3D	Tří rozměrný prostor	
3DFD	3D Fibre Deposition – tří rozměrné ukládání vlákna	
ABS	Akrylonitrid Butadien Styren – tiskový materiál	
AM	Additive Manufacturing – aditivní výroba	
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate – tiskový materiál	
ASMT	An International Standards Organization – mezinárodní standardizační organizace	
BPM	Ballistic Particle Manufacturing – výroba balistickými částicemi	
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované konstruování	
CNTs	Carbon Nanotubes – karbonové nanotrubičky	
DED	Directed Energy Deposition – mířené nanášení materiálu	
DMP	Direct Metal Printing – přímý tisk kovu	
DOD	Drop on Demant – kapka na požádání	
DRCP	Dermal Repair Construct Printer - konstrukční tiskárna pro dermální opravy	
FDM	Fused Deposition Modeling – modelování tavným uložením	
FFF	Fused Filament Fabrication – Výroba tavným vláknem	
HIPS	High Impact Polystyrenen – vysoce houževnatý polystyren	
LDM	Liquid Deposit Modeling – modelování ukládáním kapaliny	
LED	Light Emitting Diode – dioda emitující světlo	
LOM	Laminated Object Manufacturing – výroba objektů laminováním	
MEM	Melted Extruded Modeling – modelování vytlačováním taveniny	
MJ	Multi Jet – mnoho trysek	
MJP	Multi Jet Printing – tisk velkým množstvím trysek	
MJM	Multi Jet Modeling – modelování velkým množstvím trysk	
MM	Model Maker - modelář	

MPP	Metal Printing Proces – proces tisku kovu
PC	Polycarbonate – polykarbonát – tiskový materiál
PET-G	Plolyethylene Terephthalate Glycol – Polyethylentereftalát glykol
PJP	Plastic Jet Printing – tisk tryskáním plastu
PLA	Polylactic Acid – kyselina polymléčná – tiskový materiál
POM	Polyoxymethylen – tiskový materiál
PP	Polypropylene – polypropylen – tiskový materiál
PVA	Polyvinyl Alcohol – polyvinylalkohol – tiskový materiál
RP	Rapid Prototyping – rychlé prototypování
SFF	Solid Freedom Fabrication
SLA	Stereolithography - stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání materiálu
UHU	Značka univerzálních lepidel
ULTEM	Obchodní název pro polyetherimid
UV	Ultra Violet – ultrafialové záření
WDM	Wax Deposition Modeling – modelování ukládáním vosků

ÚVOD

Aditivní výroba se v dnešní době stává velmi důležitým prvkem ve výrobním průmyslu. Řadí se mezi základní technologie, které nám utváří nový pohled na výrobu produktů a na továrny budoucnosti. V dnešní uspěchané době, kdy se hledí na úsporu drahého času a materiálu, je aditivní výroba vhodným prostředkem pro rychlou a hlavně levnou výrobu prototypů. Může být také velmi výhodným řešením v kusové a malosériové výrobě.

Tato bakalářská práce si klade za cíl přiblížit problematiku aditivní výroby, její přesnosti a využití v různých odvětvích průmyslu. Úvodem jsou také popsány nejčastěji používané tiskové materiály, jejich vlastnosti a tiskové parametry. Část práce je také věnována popisu vybraných technologií využívajících principu tvorby 3D modelu postupným vrstvením materiálu. Dále také obsahuje jejich tabulkové srovnání zahrnující informace o tiskových parametrech a základních vlastnostech.

Praktická část bakalářské práce se bude zabývat tiskem, srovnáváním a hodnocením testovacích modelů tištěných na vybrané 3D tiskárně Felix 3.0. Tato část také popisuje výrobní postup tvorby 3D modelů, postup práce s programem zajišťujícím správné nastavení tiskových parametrů, import dat požadovaného formátu modelů do tiskárny a jejich následný tisk. V závěru je provedeno hodnocení přesnosti vytištěných modelů, jejich přínos pro jednoduché a levné testování stolních tiskáren běžnými uživateli a také celkové hodnocení použité 3D tiskárny.

1. SEZNÁMENÍ S VÝROBNÍ TECHNOLOGIÍ ADITIVNÍ VÝROBY

1.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba (z anglického překladu Additive manufacturing) je, na rozdíl od metod výroby pomocí odebírání materiálu, proces spojování materiálů s cílem vytvořit předměty podle údajů trojrozměrného modelu, obvykle vrstvu po vrstvě. Aditivní výroba je oficiální termín odvětvové normy (ASTM F2792), zatímco jako synonymum se běžně používá výraz 3D tisk (z anglického překladu 3D print). [4]

Aditivní výroba je zastřešujícím termínem pro soubor technologií a postupů pro různé materiály (kovy, polymery, keramiku a další). Tyto technologie dosáhly úrovně vyspělosti, která stále více umožňuje vznik komerčních aplikací s přidanou hodnotou. Aditivní výroba je celosvětově považována za jednu z klíčových základních technologií, jež budou utvářet nové přístupy k výrobě, produktům a továrnám budoucnosti. [4]

Jeden z nejvíce používaných přístupů k výrobě je tzv. rychlé prototypování (z anglického překladu Rapid prototyping). V základu se jedná o aplikaci 3D tisku nejčastěji pro přímou výrobu plastových nebo kovových prototypů nebo výrobu prototypových forem, které následně slouží k výrobě reprezentačního systému, části nebo i malosériových dílů. Vytváření prototypů má především význam pro posuzování a ověřování vyrobitelnosti, smontovatelnosti, posuzování vnějšího vzhledu a dále může mít význam pro obchodní využití. [2]-[3]

Avšak pojem aditivní výroba se používá především pro označení procesů, při nichž vzniká přímo hotový výrobek, nikoliv jen prototyp. Jinými slovy, důraz je kladen na rychlé vytvoření výstupů, jako je model, prototyp nebo základ, ze kterého budou odvozeny další modely a nakonec konečný produkt. [2]

Princip aditivní výroby

Aditivní výrobu můžeme popsat jako proces, který vytváří trojrozměrné objekty tak, že na sebe postupně skládá vrstvu po vrstvě určitý materiál a tím vytváří rozličné finální tvary podle CAD předlohy. Tento způsob je v podstatě opakem klasického (třískového) obrábění kde předmět vzniká postupným odebíráním materiálu. Nevzniká tím však žádný odpad.

Proces lze také přirovnat k tisku na inkoustových, či laserových tiskárnách, proto se také často používá označení jako 3D tisk, kde jsou však tištěny trojrozměrné objekty. [2]

Aditivní procesy, nevyžadují vlastní nástroje nebo jejich plánované pohyby. Místo toho je součást přímo postavena z digitálního 3D modelu vytvořeného prostřednictvím počítačem podporovaného projektového softwaru (z anglického překladu Computer Aided Design „CAD“ software). Digitální 3D model se prostřednictvím softwaru dodávaném výrobcí tiskáren převede na množství tenkých vrstev, které jsou za použití vygenerovaných geometrických parametrů postupně nanášeny výrobním zařízením na základní podložku. [6]

„Objekt vytvořený z vrstev konečné tloušťky je pouze aproximací originálu. Čím tenčí bude použitá tloušťka vrstvy, tím bude tvar vyrobeného blíže k originálu.“ [1]

Základní výhody aditivních technologií:

- *rychlost*: Rychlé vytvoření výstupů, odpadá čas na vývoj a přípravu nástrojů, rychlé uvedení tiskárny do provozu,
- *složitost částí*: Jelikož nejsou požadované žádné nástroje, komplexní povrchy a vnitřní prvky mohou být vytvořeny přímo při vytváření součásti,
- *rozmanitost materiálů*: Některé procesy umožňují tvořit součásti z různých materiálů při jednom procesu, a volit materiál na základě umístění v součásti. Možnost vyrábět díly z plastů, kovů, keramiky, kompozitních materiálů, a dokonce i papíru s vlastnostmi podobnými dřevu,
- *maloobjemová výroba*: Konvenční procesy nejsou příliš efektivní z hlediska nákladů pro maloobjemové produkce z důvodu vysokých počátečních nákladů v důsledku vlastních nástrojů a dlouhých časů nastavení. Aditivní výroba vyžaduje minimální nastavení a staví součást přímo z CAD předlohy, což umožňuje nízké náklady pro samotné součástky s nízkým objemem produkce. [6]

Nevýhody aditivních technologií:

- *velké součásti*: Aditivní technologie jsou určeny především pro relativně malé části, jelikož s velikostí součástí rostou také výrobní časy. Dále velikost součástí závisí na rozměrových možnostech dané tiskárny,
- *přesnost a povrchová úprava*: V současné době se aditivní výrobní procesy nemohou rovnat přesností a povrchovou úpravou s procesem obrábění. V důsledku toho, díly vyrobené prostřednictvím aditivních technologie mohou vyžadovat sekundární operace úpravy povrchu v závislosti na jejich zamýšleném použití,

- *velkoobjemová výroba*: Zatímco výrobní schopnosti aditivních procesů se zlepšují s technologií, lisování a lití jsou ještě přednostní pro velkosériovou výrobu. U velmi velkých množství, ceny za jeho části nástrojů jsou zanedbatelné a doby cyklu zůstávají kratší, než ty pro aditivní výrobu,
- *materiálové vlastnosti*: Materiálové varianty jsou omezené. Výsledkem je, že materiály, které poskytují určité požadované vlastnosti, nemusí být k dispozici. Také v důsledku způsobů zhotovení vlastnosti závěrečné části nemusí splňovat určité požadavky na konstrukci. [6]

Rozdělení aditivní výroby

Pravděpodobně nejvíce používaný způsob kvalifikace je podle vstupního materiálu:

- tekutý polymer: Stereolitography – SLA,
- diskrétní částice: Selective Laser Sintering – SLS,
- roztavený materiál: Fused Deposition Modeling – FMD,
- pevné vrstvy: Laminated Object Manufacturing – LOM. [1]

Klasifikace aditivní výroby americkou společností pro testování a materiály (ASTM) dle použité technologie:

- nástřik pojiva (Binder Jetting),
- tryskání materiálu (Material Jetting),
- vytlačování materiálu (Material Extrusion),
- fotopolymerační procesy (VAT Photopolymerization),
- tavení práškového kovu (Bed Powder Fusion),
- mířené nanášení materiálu (Directed Energy Deposition),
- plátování (Sheet Lamination). [5]-[13]

1.2 Tiskové materiály

V současné době existuje široká škála různých typů materiálů od polymerních plastů, vosků, papírových laminátů až po kompozitní materiály, kovy a keramiku. Dodávaných v různých variantách (prášek, vlákno, pelety, granule, pryskyřice atd.). [2]

V následující kapitole si představíme základní vlastnosti nejpoužívanějších tiskových polymerních materiálů a jejich tiskové parametry – viz tab. 1.

Tab. 1: Nejpoužívanější tiskové polymerní materiály

Tiskové materiály	Doporučené teploty: extruder/podložka	Výhody a nevýhody
ABS	230°C/85°C	+ tuhost, odolnost výtisků, přijatelný sklon ke kroucení – nepříjemný zápach, náchylný k praskání
PLA	195°C/50°C	+ biologicky odbouratelný, tvarově stabilní, houževnatý, silný – menší odolnost vůči zvýšeným teplotám, nízká pružnost, křehkost
HIPS	210°C/85°C	+ vhodný jako podpůrný materiál, snadno odstranitelný, rozměrově stabilní – sklon ke kroucení a ztrátě přilnavosti
Nylon	260°C/115°C	+ silný, odolný, flexibilní, využití v medicíně – velmi hydrofobický
PVA	205°C/40°C	+ jednoduše zpracovatelný, vysoký výkon lepení, rozpustný ve vodě, vhodný jako podpůrný materiál – vysoká cena, vadí mu vzdušná vlhkost
PC	270°C/120°C	+ dobrá tepelná odolnost, odolnost proti nárazům – potřeba vysoké teploty tisku
ASA	220°C/100°C	+ odolnost proti vnějším vlivům, vysoká tuhost, rozměrová stabilita, UV stabilita
PP	220°C/ 80 °C	+ venkovní použití, vhodné pro interiéry automobilů – obtížně zpracovatelný, náchylný k praskání
PET-G	200°C/70°C	+ odolnost vůči kyselinám, rozpouštědlům a změnám teplot – vyšší teplota tisku, nežádoucí vytékání z trysky

ABS

Je to jeden z nejpoužívanějších termoplastických materiálů používaných pro stavbu modelů na 3D tiskárnách metodou extruze polymeru. Jeho výhodou je tuhost, odolnost proti nízkým i vysokým teplotám a chemikáliím (kyseliny, uhlovodíky, oleje) a jeho zdravotní nezávadnost. Díly z ABS je možné lepit lepidly na bázi rozpouštědel a polyakrylátů. Jeho další velkou výhodou je menší závislost na přesném nastavení tiskové hlavy, odolnost výtisků a přijatelný sklon ke kroucení. Přesto tento materiál nelze doporučit pro běžný tisk velkých objektů. Lze snadno opracovávat broušením, vrtáním

a ostatními běžnými technikami. Při tisku je vždy třeba tisknout na základní mřížku, jelikož i menší objekty mají tendenci se snadno odtrhnout od tiskového stolu. [10]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je potřeba mít vypnuté. Pro přilnutí modelu k podložce, je nutné natřít podložku lepidlem či hustším roztokem acetonu s ABS strunou,
- doporučená teplota extruderu: 230°C,
- doporučená teplota podložky: 85°C. [7]

PLA

Je společně s ABS nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk metodou extruze termoplastu, včetně originální technologie FDM. Tento termoplastický polyester je získáván z obnovitelných zdrojů, např. z kukuřičného nebo bramborového škrobu a je biologicky odbouratelný. Pro účely 3D tisku je dodáván obvykle ve formě drátu o průměru 1,75 až 3 milimetry.

Ve srovnání s ABS je snadněji a rychleji zpracovatelný při stejných výchozích podmínkách, nicméně výrobky z něj jsou výrazně méně odolné vůči zvýšeným teplotám (začíná měknout již okolo šedesáti stupňů Celsia, zatímco ABS má hranici této tzv. „teploty skelného přechodu“ až na sto stupních). Na rozdíl od ABS není PLA tolik náchylné k deformacím a vadám vlivem chladnutí vytištěného materiálu, nevyžaduje tedy striktně použití vyhřívané podložky. Subjektivní výhodou PLA je, že při natavení neprodukuje nepříjemný zápach podobný pálenému plasty. Z materiálového hlediska jsou výrobky z PLA oproti ABS méně pružné a mají vyšší lesk. [10]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je nejlepší mít zapnuté na maximum. Pro dobré přilnutí modelu k podložce, doporučujeme natřít podložku lepidlem či roztokem acetonu s ABS strunou,
- doporučená teplota extruderu: 195°C,
- doporučená teplota podložky: 50°C. [7]

HIPS

Jedná se o termoplast, polystyrén s přídavkem kaučuku. S vlastnostmi podobnými jako ABS. Avšak pro funkční účely není tak silný. Díky svým specifickým vlastnostem se však

hodí jako podpůrný materiál. Používá se pro tisk na dvouhlavých 3D tiskárnách s kombinací s ABS či PLA a díky tomu lze vytvářet složité konstrukce. HIPS je velmi dobře rozpustný v bezbarvém kapalném uhlovodíku „limonenu“, který však s ABS nereaguje a pouze odstraní přebývajícím podpůrný materiál. Tím umožňuje vytvářet složité vnitřní struktury bez narušení pevnosti a integrity výrobku. [10]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je potřeba mít vypnuté. Pro přilnutí modelu k podložce, je nutné natřít podložku lepidlem či hustším roztokem acetonu s ABS strunou,
- doporučená teplota extruderu: 210°C,
- doporučená teplota podložky: 85°C. [7]

Nylon

Nylon je neuvěřitelně silný, odolný a všestranný 3D tiskový materiál. Flexibilní při tenkých vrstvách s velmi vysokou přilnavostí mezivrstev. Vlastnosti nylonu umožňují stavbu funkčních a pohyblivých částí. Jeho nízký součinitel tření a vysoká teplota tání, umožňuje tisk součástí, jako jsou například převodové stupně, ozubené soukolí.

Nylon je velmi hygroskopický materiál, rychle absorbuje vodu ze vzduchu. Úspěšný 3D tisk vyžaduje suché vlákno. Pokud tomu tak není, voda ve vláknech zapříčiní vznik vzduchových bublin v průběhu tisku, které zabraňují dobré přilnavosti vrstvy, výrazně tak oslabuje vytištěnou součást. Má to také vliv na povrchovou úpravu. Suchý nylon vytváří máslově hladký a lesklý povrch. [11]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je potřeba mít vypnuté. Pro dobré přilnutí modelu k podložce, je dobré natřít podložku lepidlem UHU. Doporučujeme tisknout pomaleji,
- doporučená teplota extruderu: 260°C,
- doporučená teplota podložky: 115°C. [7]

PVA

Tiskový materiál určený pro 3D tisk pomocí technologie FDM/FFF. Předností tohoto materiálu je jeho jednoduchá zpracovatelnost, kvalita tisku i při náročných detailech

a výborné vrstvení tisknutého objektu. PVA filament vyroben z polymeru je ideální pro tisk podpůrných konstrukcí, které jsou dobře rozpustné ve vodě. [10]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je nejlepší mít zapnuté na maximum. Materiál PVA má nejlepší výsledky v kombinaci s PLA materiálem. Doporučujeme tisknout pomaleji. Po ukončení tisku je nutné materiál uzavřít do vzduchotěsného obalu, aby nezvlhnul a nezměkl,
- doporučená teplota extruderu: 205°C,
- doporučená teplota podložky: 40°C. [7]

PC

Patří mezi termoplastické materiály. Má dobrou tepelnou odolnost a odolnost proti nárazům. Překvapivě si ohebnost zachovává i v chladu. Je využíván hlavně pro tisk transparentních prototypů v automobilovém, leteckém, lékařské průmyslu a v mnoha dalších aplikacích. Je to nejtvrdší materiál, který se v současnosti používá v 3D tiskárnách. Nevýhodou je vysoká teplota tisku oproti ABS a PLA, což prodlužuje dobu zpracování. [10]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je potřeba mít vypnuté. Pro dobré přilnutí modelu k podložce, je dobré natřít podložku lepidlem či roztokem acetonu s ABS strunou. Doporučujeme tisknout pomaleji,
- doporučená teplota extruderu: 270°C,
- doporučená teplota podložky: 120°C. [7]

ASA

Univerzální termoplastický materiál podobný ABS používaný pro výrobu prototypů, výrobních nástrojů a hotových výrobků. Výhodou tohoto materiálu je jeho vynikající odolnost proti povětrnostním vlivům a mechanická pevnost kombinovaná s UV stabilitou, proto je tento materiál vhodný pro venkovní použití. Disponuje vyšší tuhostí než ABS, a proto je vhodný pro náročné aplikace. ASA má nízkou hladinu žloutnutí, což je velmi důležité pro aplikace, kde je dlouhodobě kladen důraz na vzhled. Další výhodou je jeho dobrá rozměrová stabilita. [29]

Doporučené parametry risku:

- Doporučená teplota extruderu: 220°C,
- Doporučená teplota podložky: 100°C. [29]

PP

Polypropylen je termoplastický polymer - jeden z nejpoužívanějších plastů, zvláště jako obalový materiál. Používá jej textilní i potravinářský průmysl. Polypropylen má velmi dobré mechanické vlastnosti a je odolný vůči řadě chemikálií. [10]

Doporučené parametry risku:

- Doporučená teplota extruderu: 220°C,
- Doporučená teplota podložky: 80°C. [30]

PET-G

Někdy také nazývaný T-Glase je termoplast ze skupiny polyesterů. Výrobky z něj jsou zdravotně nezávadné, plasticky pružné a odolné vysokému zatížení. Na rozdíl od jiných materiálů je více odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům. PET-G je také odolný vůči vysokým i nízkým teplotám. [31]

Doporučené parametry tisku:

- chladiče, které ochlazují model, je nejlepší mít zapnuté na maximum. Pro dobré přilnutí modelu k podložce, je dobré natřít podložku lepidlem či roztokem acetonu s ABS strunou. Doporučujeme tisknout pomaleji,
- doporučená teplota extruderu: 200°C,
- doporučená teplota podložky: 70°C. [7]

Tab. 2: Další známé, oblíbené materiály

Tiskové materiály	Doporučené teploty: extruder/podložka	Výhody a nevýhody
POM	180°C/ - °C	+ vysoká tuhost, tvrdost a pevnost - nevhodné pro dlouhodobý styk s vysoce koncentrovanými kyselinami a chlorem
Timberfill	185°C/40°C	jednoduchá zpracovatelnost, biologicky odbouratelný, vzhled dřeva
Flexfill	210°C/40°C	netoxický, schopný rozkladu, elastický
Metalické	195°C/50°C	imitace kovu, vlastnosti PLA
3DXNano™ ESD	230°C/105°C	elektricky vodivý materiál poskytující antistatickou ochranu

POM

Materiál také známý jako acetal, polyacetal a polyformaldehyd, je konstrukční termoplast použitý k tvorbě přesných dílů, které vyžadují vysokou tuhost, nízké tření a vynikající rozměrovou stabilitu. POM se vyznačuje vysokou pevností, tvrdostí a tuhostí při teplotách až -40 ° C. [32]

Timberfill

Tiskový materiál určený pro 3D tisk pomocí FFF/FDM technologie. Předností tohoto materiálu je jeho jednoduchá zpracovatelnost, kvalita tisku i při náročných detailech a výborné vrstvení tisknutého objektu. Vykazuje podobné mechanické vlastnosti jako ABS nebo PLA a umožňuje tak tisk modelů na 3D tiskárnách, které budou mít vzhled dřeva. Doporučuje se použít trysek větších průměrů 0,4 – 0,5 mm. Je vyroben z biologicky odbouratelného materiálu na bázi dřeva. [33]

Flexfill

Jemný, měkký, elastický a vystavením horké vodě dokonce ohebný materiál. Umožňuje tak přetváření modelů do určitých tvarů. Jde o nový adaptabilní materiál z vláken polyesteru. Tento materiál se dá využít také v lékařství, protetice a u netkaných textilií. Je netoxický a schopný rozkladu. [33]

Metalické

Měděné (Cooper), mosazné (Brassfill), bronzové (BronzeFill) vlákno. Tento materiál imituje barvu a strukturu kovu. Hodí se tak pro tisk modelů, které mají představovat výrobky z kovu. Tiskové vlastnosti jsou stejné jako u PLA. [33]

3DXNano™ ESD

Skupina speciálních filamentů, které používají mnohostěnné karbonové nanotrubičky (CNTs) pro získání požadovaného stupně elektrické vodivosti i při zachování vlastností základního materiálu. CNTs jsou neuvěřitelně efektivní, zachovávají pružnost vlákna a poskytují trvalou antistatickou ochranu dílů. [10]

Existuje nespočet dalších druhů tiskových materiálů. Elektricky vodivé, světélkující, imitující různé druhy materiálů, materiály různých barev a forem. V předešlé kapitole jsme si ukázali jen zlomek materiálů, které jsou u uživatelů stolních tiskáren nejvíce oblíbené.

1.3 Porovnání mechanických vlastností tištěných materiálů

V následující tabulce 3. je provedeno porovnání mechanických vlastností základních polymerních materiálů. Jelikož je doposud malé množství údajů o mechanických vlastnostech tiskových materiálů, nepodařilo se mi vyhledat veškeré údaje, a proto jsou tyto hodnoty uvedeny pouze jako orientační. Jejich testování a zkoušení je rozsáhlá problematika, kterou by bylo možné zpracovat jako samostatnou práci. Z tohoto důvodu zde uvádím pouze jejich tabulkové srovnání.

Tab. 3: Porovnání mechanických vlastností tištěných materiálů

Tiskový Materiál	Napětí na mezi kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E-Modul pružnosti v tahu [MPa]	Tvrдость podle Rockwella
ABS	45	43	10	2300	110
PLA	60	56	7	1975	90
HIPS	43	28	55	1700	L79
Nylon	80	83	70	3000	-
PVA	45	65	-	-	-
PC	66	72	>80	2400	R115
ASA	56	35	8	2600	-
PP	-	-	-	-	M97
PET	80	48	70	2800	105

2. KLASIFIKACE ADITIVNÍ VÝROBY DLE POUŽITÉ TECHNOLOGIE

Ačkoliv se pro označení veškerých procesů aditivní výroby využívá synonymum "3D tisk", tak ve skutečnosti tento pojem zahrnuje spousty jednotlivých procesů, které se liší v závislosti na materiálu, způsobu vytváření vrstev a na použitém stroji v technologii. Z tohoto důvodu v roce 2010, Americká společnost pro testování a materiály (ASTM) skupina "ASTM F42 – Additive Manufacturing", vypracovala soubor norem, které klasifikují rozsah aditivních výrobních procesů do 7 kategorií (viz kap. 1.1). [13]

V nadcházející části této kapitoly je proveden rozbor všech sedmi kategorií výrobních procesů. Dále je také proveden stručný tabulkový přehled základních informací vybraných výrobních technologií, řazených do kategorií nástřiku pojiva, tryskání materiálu a extruze materiálu (viz tab. 4.).

2.1 Technologie nástřiku pojiva – Binder Jetting

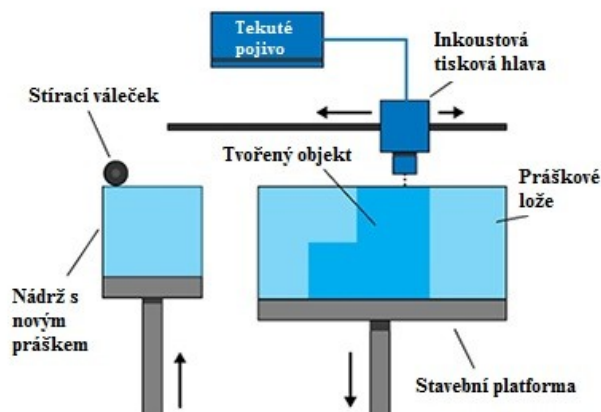
Technologie nástřiku pojiva (z anglického překladu Binder Jetting) je aditivní výrobní proces, při kterém je kapalně vazebné činidlo selektivně ukládáno na tenkou vrstvu práškových částic materiálu za pomoci inkoustové tiskové hlavy. Vytvrzení pojiva může být realizováno například pomocí UV světla (obr. 1).

Obvykle se používají dva zásobníky, kde v jednom je produkt tvořen a v druhém zásobníku je uložen práškový materiál. Po nanesení vrstvy pojiva na vrstvu práškového materiálu se stavební platforma sníží o hodnotu tloušťky vrstvy, stírací lišta nebo váleček přesune novou vrstvu prášku z druhého zásobníku na právě vytvořenou vrstvu objektu a celý proces se tak opakuje. Vrstvy materiálu jsou tímto způsobem vzájemně spojovány do formy výsledného objektu. Princip technologie je znázorněn na obr. 1. [12]

Výhodou této technologie je, že je poměrně rychlá, jednoduchá a levná, pracuje s širokou paletou materiálůvých typů včetně kovu, písku a keramiky. Nevyžaduje žádné podpůrné struktury. Díly vyrobené touto technologií jsou v podstatě slepené částice, což způsobuje křehkost součástek s omezenými mechanickými vlastnostmi (nejsou-li dále zpracovávány). [19]

Některé materiály, jako je písek, nevyžadují žádné další zpracování. Jiné materiály se obvykle vytvrzují, slinují a v některých případech se mísí s jinými materiály, v závislosti

na aplikaci. Izostatické lisování za horka se může použít za účelem dosažení vysoké hustoty podobné pevným kovům. [18]-[19]



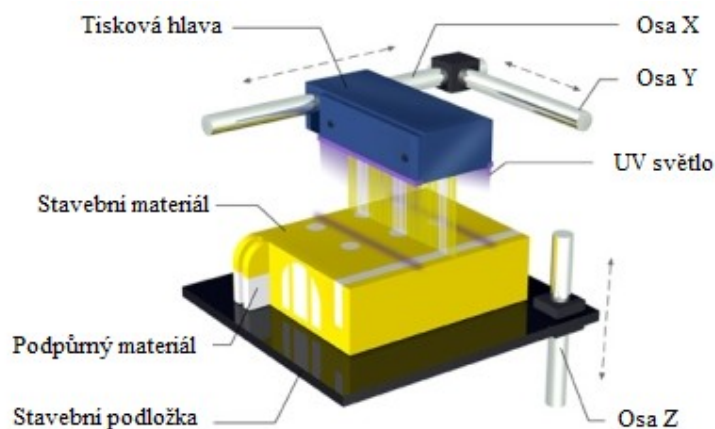
Obr. 1: Technologie nástřiku pojiva [13]

2.2 Technologie tryskání materiálu – Material Jetting

Technologie tryskání materiálu vytváří objekty podobným způsobem jako dvourozměrná inkoustová tiskárna. Použitý kapalný materiál je na stavební plošinu ukládán buď kontinuálně nebo podobně jako u DOD technologie ve formě kapek tiskovou hlavou (obr. 2). [13]

Princip tvorby objektu spočívá v tryskání kapalného materiálu tiskovou hlavou pohybující se v horizontálním směru na sestavovaný povrch nebo přímo na stavební platformu, kde ztuhne a následně se vytvrzuje UV světlem, vrstvu po vrstvě. Tisková hlava převážně obsahuje dvě trysky pro tisk různých materiálů. Při tvorbě komplexních složitých tvarů se používají nosné materiály na bázi vosku a fotopolymery jako stavební materiály. Princip technologie je znázorněn na obr. 2. [13]

Výhodou těchto technologií je vysoká přesnost, rozlišení a velice kvalitní povrch vytištěného objektu. Vzhledem k používanému materiálu – vosku – jsou výtisky poměrně křehké a jejich uplatnění je především v oblasti prototypů a matric pro výrobu přesných odlévacích forem (medicína, zubní náhrady, šperkařství). Jako nevýhodu můžeme považovat poměrně dlouhou dobu tisku. [8]-[12]



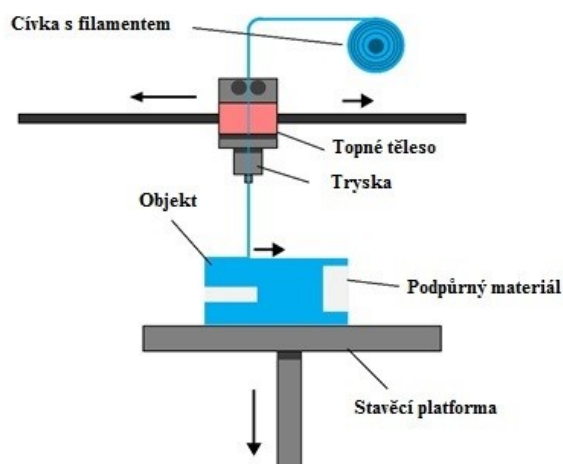
Obr. 2: Technologie tryskání materiálu [12]

2.3 Technologie extruze termoplastu – Material Extruzion

Technologie vytlačování tvoří základ aditivní výroby. Přístroje využívající tuto technologii pracují na principu nuceného protlačování polotekutého materiálu skrze vyhřívanou trysku a jeho následné nanášení řízeným způsobem na stavěcí platformu, vrstvu po vrstvě až do úplného sestavení požadované struktury (obr. 3). [14]

Stavební materiály jsou obvykle polymerní vlákna navinuta na cívku v různých průměrech. Tuto technologii můžeme přirovnat k automatizované verzi tavné lepicí pistole využívanou v umění a různých řemeslech. Poté co je vrstva materiálu nanесena tryskou na stavěcí platformu, se platforma sníží nebo se tryska posune nahoru o požadovanou hodnotu tloušťky vrstvy a nová vrstva může být nanесena. [14]

V případech, kdy jsou využity dvě trysky v přístroji, jedna z trysek se obvykle používá pro nanášení nosného (podpůrného) materiálu rozpustného ve vodě a druhá pro nanášení stavebního materiálu. Tři nebo více trysek jsou převážně používány ve strojích určených pro tkáňové inženýrství a výzkum. Pro ukládání nosných struktur a dalších biologicky kompatibilních materiálů v různých oblastech implantátů. [14]



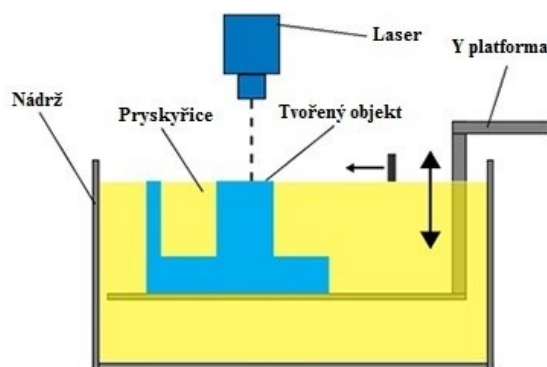
Obr. 3: Technologie extruze materiálu [13]

2.4 Fotopolymerizační procesy – VAT Photopolymerization

Fotopolymerizační procesy zahrnují selektivní vytvrzování tekutého fotopolymeru uloženého v nádrži za použití určitého typu světelného zdroje. Stereolitografie, je první patentovaný a komerčně známý proces aditivní výroby, který pracuje na principu vytvrzování fotopolymerního materiálu za pomoci UV laseru (obr. 4). [14]

Vzhledem k tomu, že proces používá kapalně materiály, neposkytuje tak objektu složitých tvarů nosnou konstrukci a je tedy nutno vytvářet podpůrnou síť ze stejného materiálu jako tvořený objekt. Na rozdíl od metod využívajících práškové materiály, kde podpory vytváří nevázaný materiál a není nutno složitého odstraňování. [13]

Stavební platforma sloužící jako nosný prvek tiskového stroje je uložena těsně pod hladinou kapaliny ve vzdálenosti jedné vrstvy. Po naskenování hladiny laserem dochází k vytvrzení fotopolymerní pryskyřice a k vytvoření požadovaného průřezu objektu. Platforma se sníží o hodnotu tloušťky vrstvy, fotopolymer se dostane na povrch již vytvořené vrstvy, stírací lišta zarovná povrch nanesené vrstvy a celý proces vytvrzování se opakuje až do dokončení součásti. [13]-[14]



Obr. 4: Fotopolymerizační proces [13]

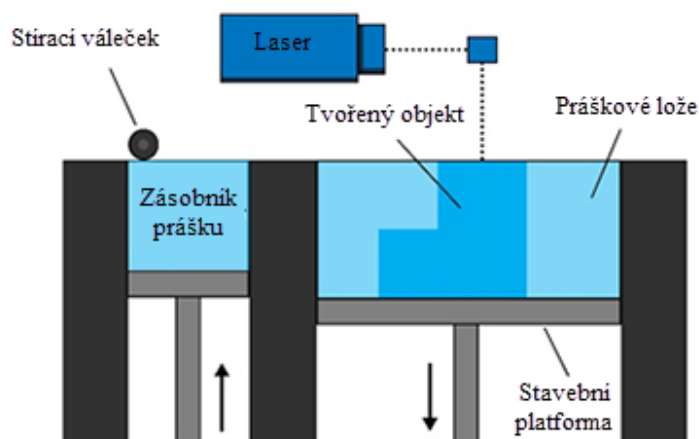
2.5 Spojování práškových materiálů – Powder Bed Fusion

Stoje využívající tuto technologii pracují podobným způsobem jako BJ technologie. Namísto tisku lepidla na vrstvu prášku se však používá tepelná energie k roztavení prášku do požadovaného vzoru. [14]

Ve většině zařízení je laser nebo elektronový paprsek využíván k roztavení polymeru nebo kovových prášků za účelem vybudování trojrozměrného předmětu. Prvním krokem je nanesení tenké práškové vrstvy materiálu na stavební platformu a vytvoření první vrstvy průřezu modelu za pomoci tepelné energie. Nová vrstva sypkého materiálu je válečkem nahnuta na tu předchozí a následně je roztavena do požadovaného vzoru. Roztavením se tyto dvě vrstvy spojí a celý proces se tak opakuje až do vytvoření požadovaného objektu. Princip technologie je znázorněn na obr. 5. [13]-[14]

V případě polymerních prášků, je vytvářená část obklopena stavebním materiálem a tak mohou být vytvářeny složité trojrozměrné objekty bez použití podpor. Nicméně, u kovových prášků v průběhu tuhnutí dochází k deformaci vytvořené části vlivem tepelného smrštění. Proto se používají podpěry pro připevnění části na pevnou základovou desku k zachování přesnosti dílů a k zabránění jejího zdeformování. Tyto podpěry se však vytváří až poté co je objekt vytvořen. [14]

Polymerní a kovové části vyrobené za použití těchto technik jsou stále široce používány v letectví, obraně a u jiných technických systémů. [14]



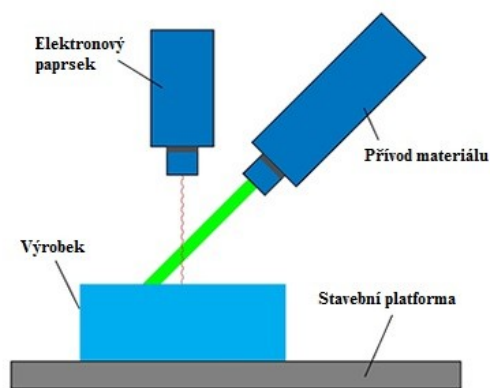
Obr. 5: Spojování práškových materiálů [13]

2.6 Mířené nanášení materiálu – Directed Energy Deposition

Ukládání mířeným nanášením materiálu (DED) je skupina procesů, ve kterých je materiál přímo nanesen na konečné umístění v produktu. Principem této metody je nástřik materiálu do vyhřívané zóny, vytvořené laserovým paprskem, svazkem elektronů nebo ionizovaným plynem. Stejně jako u jiných metod, které stříkají produktový materiál, DED umožňuje snadnou změnu funkčních materiálů produktu v průběhu vytváření objektu. Princip technologie je znázorněn na obr. 6. [12]

K vytváření dílu s přesahy a složitou strukturou, se používají 5osé nanášecí systémy (tak, že materiál může být nanášen v libovolné poloze), nebo je využit pro ukládání sekundárního nosného materiálu. Jelikož se tyto systémy obvykle používají k výrobě kovových součástí nebo kompozitních struktur, jejich případné podpory vyžadují proces obrábění k jejich odstranění. [14]

Technologie nanášení přímou energií (DED) se používá především pro přidávání prvků ke stávající struktuře (například přidání zpevňujících žeber na desku), nebo na opravu poškozených nebo opotřebovaných dílů. Ve většině případů jsou tyto postupy použity k vytvoření kovových konstrukcí, a proto jsou běžně označovány jako stroje aditivní výroby pro nanášení kovů. [14]

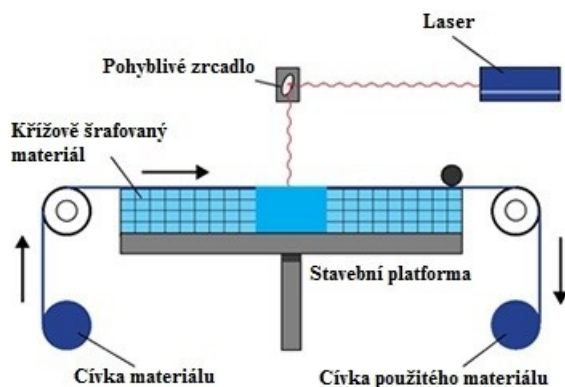


Obr. 6: Mířené nanášení materiálu [13]

2.7 Plošné vrstvení materiálu – Sheet Lamination

Plošné vrstvení je skupina procesů, které vytvářejí objekty řezáním a stohováním listů materiálu (obr. 7). Každý list představuje jednu průřezovou vrstvu CAD modelu dílu, která je vyřezána počítačem řízeným řezacím nástrojem. Tento přístup lze aplikovat jak u papírových, plastových a kovových plechů tak i u materiálů imitujících dřevo. Pojivo se obvykle používá pro lepení papírových a plastových fólií, zatímco u kovových materiálů je použito svařování (tepelné pájení, svařování nebo ultrazvukové svařování). Laminátové objekty jsou často používány pro estetické a vizuální modely a nejsou vhodné pro konstrukční použití.

Tento proces může spojit různé materiály a vyžaduje relativně málo energie, jelikož přidávaný materiál není roztavován. [2]-[14]



Obr. 7: Plošné vrstvení [13]

Tab. 4: Shrnutí vlastností vybraných technologií aditivní výroby

Aditivní výroba	Podoba výchozího materiálu	Zkratka aditivní výroby	Použitý materiál	Proces formování vrstev	Způsob nanášení	Tloušťka vrstvy [mm]	Výhody	Nevýhody
Technologie nástřiku pojiva Blinder Jetting	Kapalný polymer, pojivo	Indirect 3DP		tisková hlava	selektivní ukládání pojiva		vhodné pro výrobu forem na odlévání kovů a buněčných struktur	
		DOD	vosky, termopolymery	tisková hlava	vrstvení taveného materiálu	0,013	vysoká přesnost, rozlišení a kvalita povrchu	dlouhá doba tisku, křehkost výrobků
Technologie tryskání materiálu Material Jetting	Kapalný polymer, termoplastický materiál	Direct 3DP	vosky, polymery	tisková hlava	princi 2D tiskáren			
		PolyJet	fotopolymery	vytvrzování UV lampou	nástřik roztaveného materiálů	0,016–0,6	hladké povrchy, složité detaily, využití v letectví a automobilovém průmyslu	
		MJP	fotopolymery	vytvrzování UV lampou	nástřik roztaveného materiálů	0,016	jednoduchá příprava tisku, velmi hladké povrchy	dlouhá doba tisku
		InkJet-MM	termopolymery	dvě tiskové hlavy	tlakové nanášení kapek materiálu		5 stupňů volnosti tiskové hlavy, není nutno podpůrných konstrukcí	
		RPBO-DIW	keramické suspenze	pneumatický dávkovač	laminární ukládání			
		MPP	kovové a keramické prášky	slinování, lisování	elektrostatické nanášení prášku	0,1	modely vhodné rovnou k použití	
Technologie extruze materiálu Material Extruzion	Termoplastický materiál	FDM	polymery, vosky	tisková hlava	vytlačování tavicího se vlákna	0,05–0,33	nízká provozní teplota, snadná obsluha, nízké náklady	nižší přesnost, horší povrchová úprava
		PJP	termopolymery	tisková hlava	vytlačování tavicího se vlákna	0,014	nízká cena, dostupnost	horší povrchová úprava
		Bioplotting	hydrogely, polymery, monomery	teplem indukované tuhnutí, chemická reakce	vytlačování materiálu srže jehlu		využití v biomedicině, stavba buněčných struktur	
		WDM	vosky	tisková hlava	nástřik nataveného materiálu	0,01-0,20	extrémně přesné voskové modely, dentální náhrady, velmi jemné detaily a povrchové úpravy	
		3DFD	polymery, vosky, keramické materiály, hydrogely	tisková hlava, injekční stříkačky	vytlačování materiálu			
		MEM	polymery, vosky	tisková hlava	vytlačování tavicího se vlákna	0,05-0,33	nízká provozní teplota, snadná obsluha, nízké náklady	nižší přesnost, horší povrchová úprava
		LDM	tekuté keramické materiály	tisková hlava	vrstvení tekutého materiálu		možnost montáže na FMD tiskárny	nerovnoměrné vysychání, smršťování a praskání

3. REŠERŠE VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ

Tato kapitola je věnována rozboru vybraných tiskových technologií spadajících pod tři druhy aditivní výroby patřící do sedmi základních typů výrobního procesu. Technologie nástřiku pojiva, tryskání tekutého materiálu a extruze materiálu. Vybrané skupiny jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 5: Vybrané typy technologií aditivní výroby

Technologie nástřiku pojiva	Technologie tryskání materiálu	Technologie extruze materiálu
Nepřímý 3D tisk DoD	Přímý 3D tisk Polyjet MJP DMP Inkjet MM RPBO – DIW HVIP MPP	FDM – FFF PJP BioPlotting – BioPrinter DRCP Direct Write WDM 3DFD MEM LDM

3.1 Technologie nástřiku pojiva

Nepřímý 3D tisk

Nepřímé metody 3D tisku (3DP) se používají pro přímou výrobu negativních pískových forem pro odlévání kovů nebo lehkých buněčných struktur.

Při používání tradičních výrobních postupů jsou díly vyráběny ze standardních materiálů, u kterých jsou známy mechanické vlastnosti. Avšak využití těchto technik jsou omezeny výhodami, které nabízí aditivní výroba (svoboda designu, úspora materiálu, rychlé dodací lhůty). [15]

DOD

Je to „inkoustová“ technologie používající k tisku přímé vrstvení taveného materiálu na voskové bázi. Princip je podobný Inkjet technologii. Tisková hlava obsahující převodník, obvykle piezoelektrický prvek nebo tepelný ohřívač, vyšle tlakový impuls do

kapalného materiálu a tím přesně odměří jeho potřebnou dávku procházející tryskou. Materiál produkovaný ve formě kapek je po dopadu na podložku ihned vytvrzen. Vrstvením takto produkovaného materiálu vzniká trojrozměrný objekt. [34]

Mezi výhody patří vysoká přesnost, rozlišení a velice kvalitní povrch vytištěného modelu. Nevýhodou je poměrně dlouhá doba tisku. Tloušťka nanesených vrstev může dosahovat minima až 0,02 mm, rozměrová tolerance se pohybuje okolo 0,025 mm. Při tištění komplexních složitých tvarů je nutno požit podpurné materiály.

Výrobky vytvořené metodou DOD se vyznačují křehkostí. Uplatnění nachází především v oblasti prototypů, medicíně (zubní náhrady), šperkařství a výrobě matric pro výrobu přesných odlévacích forem. [8]

3.2 Technologie tryskání materiálu

Přímý 3D tisk

Přímý 3D tisk využívá technologii tryskání, která je používaná u 2D tisku již od roku 1960. Stejně jako u inkoustových 2D tiskáren se trysky 3D tiskáren pohybují tam a zpět a dávkuje tekutinu. Navíc mají schopnost pohybovat se i ve vertikálním směru pro vytváření více vrstev materiálu na stejném povrchu. Kromě toho, tyto tiskárny nepoužívají inkoust, ale dávkuje husté voskové materiály a plastové polymery, které po zatuhnutí tvoří každý nový průřez celistvého 3D objektu. [17]

PolyJet

Patentovaná inkoustová technologie PolyJet, pracuje na bázi nastříkávání nejmodernějších fotopolymerních materiálů na platformu v ultratenkých vrstvách (0,016 mm až 0,6 mm), vrstvu po vrstvě, až do vytvoření konkrétního dílu. Každá fotopolymerní vrstva je vytvrzena UV zářením okamžitě po nastříknutí, což má za následek vytvoření modelů, jež je možné ihned po vytvoření použít bez nutnosti dalšího tvrzení. U složitých geometrií s převisy je použit podpurný materiál připomínající gel. Ten je speciálně navržen pro složité konstrukce a lze jej velmi snadno ručně odstranit vodou.

Technologie PolyJet nám nabízí mnoho výhod, dokonale jemné detaily, hladké povrchy, rychlost a přesnost tisku. [21]

MJP

Technologie tisku větším množstvím trysek (z anglického překladu Multi Jet Printing) nebo také modelování více tryskami (z anglického překladu Multi Jet Modeling) se podobá

klasickým 2D inkoustovým tiskárnám, místo inkoustu je použit fotopolymerní materiál, který je udržován v kapalném stavu uvnitř zařízení předtím, než je dodán do trysek. Tisková hlava obsahuje až 352 umístěných v jedné rovině, přičemž je každá tryska samostatně řízená počítačem. Po nanesení každé vrstvy je vždy materiál vytvrzen UV lampou a nadále povrch zarovnán stírací lištou, čímž zajistí vytvoření přesné plochy. Tento proces zajišťuje velmi hladké povrchy, ale doba tisku je velmi dlouhá.

Stejně jako u 2D inkoustové tiskárny se tisková hlava pohybuje pouze v ose X. Pohyb po ose Y a Z obstarává nosná deska. Pro složitější konstrukční prvky jsou vytvářeny podpůrné prvky. Za výhodu technologie MJM lze považovat fakt, že není nutná jiná příprava, než převedení digitálního modelu do formátu STL, který může být vytvořen v libovolném 3D modelovacím programu.

InkJet – MM

Technologie Model Maker 3D Plotting pracuje na stejném principu jako technologie BPM (Ballistic Particle Manufacturing). Rozdíl je v tom, že Model Maker 3D Plotting pracuje se dvěma tiskovými hlavami, přičemž první nanáší materiál a druhá ho tvaruje. [18]

Technologie BPM využívá principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení materiálu (termoplastu) ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu a tam bezprostředně po dopadu vytvrzeny. Cíleným nanášením dalších kapek na už nanesený materiál se vyrobí celá trojrozměrná součást. Technologie BPM pracuje pouze s jednou tiskovou hlavou, která má 5 stupňů volnosti. Tato metoda umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce. [18]

RPBO

Technologie rychlého prototypování řízeným robotickým ukládáním (z anglického překladu Rapid Prototyping Robotic Dispersing) přejala analogicky představu o technologii 3D-Biplotteru pro vyvinutí dávkovacího systému. Robotický systém skládající se z jednosložkového pneumatického dávkovače. [36]

Robocasting: Technologie laminárního ukládání keramických suspenzí pod vysokým tlakem k vytvoření 3D konstrukcí za pomoci robotiky se nazývá robo-lití (z anglického překladu robo-casting). Na rozdíl od procesu biplottingu, ve většině případů robocastingu má sestava stacionární disperzní hlavu, zatímco výrobní plošina se pohybuje v rovinné

a svislé ploše. Inkousty používané pro robocasting musí proudit pod neustálým tlakem. Získají tak dostatečnou pevnost proto, aby unesly svou váhu a váhu následujících vrstev. Pojem robocasting závisí v podstatě na reologii suspenze a také částečně na rychlosti sušení nanesených vrstev. Proto tato technologie není vhodná pro stavbu z hydrogelů. [36]

DIW : Přímé inkoustové psaní (z anglického překladu Direct Ink Writing) umožňuje využití široké škály materiálu, které mohou být tvarovány do různých tvarů a rozměrů. Inkousty na bázi koloidních roztoků jsou využívány jak v rovinném tisku tak v 3D tisku a vyznačují se dosažením menší tloušťky vrstvy. [36]

Koloidní gely jsou umístěny v jednotlivých injekčních stříkačkách namontovaných na pohybové části v ose z. Vytlačování probíhá skrze válcovou trysku na pohybující se podložku v osách X a Y. Inkousty používané v této technice musí obsahovat vysoký podíl koloidních částic zabraňující smrštění při sušení, musí mít schopnost odolávat napětí v tlaku vyplývající z kapilárního napětí. [36]

MPP

Proces tisku kovu (z anglického překladu Metal Print Process) je výrobní proces, který staví komponenty přímo z kovových (keramických) prášků prostřednictvím vrstvených výrobních principů. Tato technika výroby je založena na komerčně osvědčené technologii kopírovacích přístrojů, které používají maskovou projekci a elektrostatickou přitažlivost.

Za pomoci LED tiskové hlavy a elektrostatického náboje je na desce fotoreceptoru vytvořen obraz části řezu tvořeného objektu. Přesunutím nabitě desky nad zásobník s práškovým materiálem dojde k přitažení částic materiálu pouze na nabitá místa fotoreceptoru. Za pomoci dvou až tří světelných expozic je možno vytvořit požadovaný obrazec z různých materiálů. Práškové vrstvy vytvořené na fotoreceptoru jsou převezeny do konsolidačního systému, kde je fotoreceptor osvětlen silným zdrojem záření tak, že ztratí svůj náboj a prášek je uložen na podložku. Nanesené vrstvy prášku jsou nadále za studena lisovány. Tento cyklus se opakuje do dokončení požadované součásti. Poslední vrstva se lisuje za horka při teplotě slinování. [19]

3.3 Technologie extruze materiálu

FFF/FDM

Význam a princip FFF (Fused Filament Fabrication) technologie a FDM (Fused Deposition Modeling) technologie je v podstatě stejný, liší se akorát tím, že FDM je ochranný název technologie od zakladatelské společnosti Stratasys.

Model se vytváří nanášením jednotlivých vrstev z různých netoxických termoplastů, polyamidu, polyetylenu nebo vosků systémem krok po kroku. Materiál ve tvaru tenkého vlákna vychází z vyhřívané trysky, která se pohybuje v rovině X, Y nad pracovním prostorem. V trysce je materiál ohříván nad teplotu tavení. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytváří tak požadovanou ultratenkou vrstvu, která ihned ztuhne. Nosná deska se vždy po nanesení jedné vrstvy sníží o hodnotu tloušťky této vrstvy. Na podepření přečnávajících částí je nutné vytvořit podpůrnou konstrukci z lepenky nebo polystyrenu.

Nejčastěji používanými materiály pro FDM jsou termoplasty ABS a PLA. V profesionálních aplikacích jsou využívány další materiály jako polykarbonáty nebo speciální termoplasty typu Ultem. [8, 18]

Mezi výhody této metody patří dostupnost přídavných materiálů, snadná výměna materiálu, zdravotní nezávadnost, nízká provozní teplota, nízké náklady na údržbu, velmi kompaktní rozměry. Nevýhodou je časová náročnost výroby, nižší přesnost a horší povrchová úprava tištěných modelů. [8, 18]

PJP

Tisková technologie nástřiku plastů (z anglického překladu Plastic Jet Printing) je další 3D technologie tisku, která využívá teplo a tlak k vytlačení souvislé „housenky“ materiálu. Plastové termopolymery jsou jediný materiál, který PJP využívá. Technologie je poměrně podobná FDM/FFF technologii, nicméně PJP tiskárny jsou určeny především jako čistě spotřební (uživatelské) tiskárny. Výhodou je nízká cena, dostupná pro běžné spotřebitele. Nevýhodou se stává horší povrchová úprava modelu a omezené velikosti modelů dané velikostí tiskárny. [20]

Bioplotting

Bioplotter představuje klíčový prvek 3D technologie ukládání vláken. Je to dispergační stroj vyvinutý pro stavbu lešení z hydrogelu pro měkké tkáňové inženýrství.

Skládá se z rozprašovače, opatřeném vyhřívacím pláštěm, pohyblivém ve třech osách. 3D bioplotter je schopen vytlačovat pasty, roztoky, tepelné tavné lepidla, disperze, polymery, monomery, nebo reaktivní roztoky. Je to mnohem univerzálnější systém než FDM.

Základní postup se skládá z vytlačování materiálu, uloženého v pouzdře skrze tenkou jehlu za pomoci řízeného stlačeného vzduchu. Materiál může být dávkován v přítomnosti vzduchu, nebo do kapalného prostředí. Proces tvrdnutí zahrnuje teplem indukované tuhnutí a tuhnutí vyvolané chemickou reakcí nebo vysrážením. Znalost parametrů zpracování hraje klíčovou úlohu při vývoji 3DFD lešení. [26]

WDM

Tato technologie pracuje na principu nástřiku drobných kapiček nataveného materiálu podobnému vosku v celistvých vrstvách na stavební desku. Následně je každá vrstva zarovnána pomocí rotačního hoblovacího nástroje pro zajištění přesnosti. Používá se na produkci extrémně přesných voskových modelů dentálních náhrad s velmi jemnými detaily a hladkými povrchy s rozlišením 5000 dpi na osách X, Y a až 8000 dpi na ose Z. [35]

3DFD

3D ukládání vlákna (z anglického překladu 3D Fibre Deposition) je technologie na bázi vytlačování, schopná zpracovat roztavené termoplastické polymery, hydrogely nebo keramické materiály. Při použití termoplastických polymerů, 3DFD pracuje podobně jako FDM technologie. Považujeme ji za XYZ robotickou jednotku. Polymery jsou umístěny v injekčních stříkačkách z nerezové oceli vyhřívané přes termosetové kazetové jednotky. Po roztavení je materiál protlačován ve formě vlákna na podložku za působení tlaku dusíku. CAD model je vytvořen postupným ukládáním vrstev až do jeho finální podoby. Vytlačovací tlak a rychlost depozice jsou typicky optimalizovány v závislosti na viskozitě polymeru a na rozměrech vytlačování jehly. [22]

MEM

Tato technologie tavného, vytlačovacího modelování (z anglického jazyka Melted and Extruded Modeling) je shodná s FDM technologií. MEM je vynalezena a vyvinuta na univerzitě Tsinghua University v Pekingu. Kdy se od roku 1996 uvádí pod obchodní jménem TierTime Technology Co. Ltd. Je to open source projekt tiskáren, jako je RepRap, používající stejnou technologii taveného vlákna (FFF). Pravidla těchto technologií jsou však stejná, snaží se jen eliminovat patentovaný název FDM. [23]

LDM- Liquid Deposition Modeling

Technologie modelování ukládáním kapaliny (z anglického překladu Liquid Deposition Modeling) je proces, který spočívá v nanášení jednotlivých vrstev tekutého keramického materiálu, jílu, zirkonu, porcelánu a jiných na pevnou stavební platformu.

Inteligentní LDM extruder vyvinut pro tisk keramických materiálů obsahuje tlakovou část zajišťující dopravu materiálu do šnekového šroubu a trysky extrudéru. Tento proces je celý řízen krokovým motorem, který udržuje přesný tok a konzistenci materiálu. Tím se také zabrání vzniku vzduchových bublin, deformací a jiných závad, které mohou způsobit poškození tištěného modelu. Úroveň přesnosti tištěných vrstev dosahuje v mnohém kvalitě tištění plastových polymerů.

Výhodou LDM extrudéru je možnost jeho montáže na klasické FDM tiskárny. Během tisku může dojít k nežádoucímu, nerovnoměrnému vysychání, smršťování a praskání již vytištěného modelu. [24]-[25]

4. VÝROBNÍ PŘESNOST 3D MODELU

Principem všech RP technologií je rozřezání 3D dat na rovinné vrstvy. Vrstvy mají konstantní tloušťku, která je důležitým faktorem ovlivňujícím přesnost prototypu a vykreslení detailů. Pro tyto účely se převádějí data do speciálního datového formátu s označením STL. Modely jsou v tomto formátu tvořeny sítí rovinných trojúhelníků, které obalují původní datový model s požadovanou přesností. Přesnost lze upravovat v závislosti na velikosti a složitosti modelu. U menších a složitějších modelů se využívá maximálního nastavení (odchylka trojúhelníkové obálky od původního tvaru v řádu tisícín milimetrů), u větších modelů může být nastavena odchylka v řádu desetin milimetrů. Nastavení přesnosti obálky ovlivňuje hlavně velikost výsledného datového souboru – počet trojúhelníků – a tedy možnosti práce s ním. [27]

V porovnání s výrobou na CNC obráběcích centrech je přesnost aditivní výroby nižší. Zpravidla se uvádí hodnota 0,1 mm na 100 mm délky, ale velmi se liší v závislosti na použité technologii a materiálu. Velmi negativně na ní působí dilatace materiálu teplem způsobená zahříváním až natavováním materiálu při stavbě u některých metod. [37]

Přesnost ovlivňuje navíc i parametr daný samotným principem stavby součásti po vrstvách. Tyto vrstvy nejsou dostatečně schopné vytvořit spojitě plochy a nahrazují ho schodovitým povrchem. To se nejvíce projevuje při výrobě válcových tvarů s vodorovně umístěnou osou. Problém schodovitosti je možné dostatečně zmírnit zmenšením tloušťky vrstev v okolí takovýchto detailů. Stavba součásti adaptivní tloušťkou vrstev je rozumným kompromisem mezi rychlostí a přesností. [37]

Kvalita tisku je tedy odvozena od parametrů jednotlivých vrstev a na nastavení přístroje. Můžeme říci, že čím silnější tyto vrstvy jsou, tím rychleji je model vyprodukován, ale kvalita tisku je tímto snížena. Jednotlivé vrstvy jsou tak více viditelné a tvoří nežádanou strukturu na povrchu objektu.

4.1 Základní faktory ovlivňující přesnost tisku:

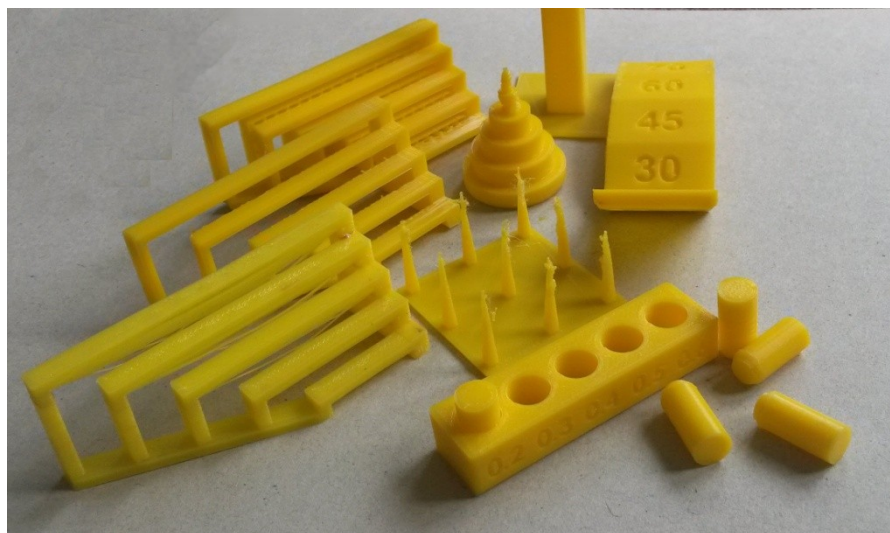
- *tloušťka vrstvy*: nejnižší možná výška vrstvy udává přesnost tisku ve vertikálním směru, někdy také nazývané jako rozlišení modelu. Ovlivňuje především výslednou strukturu povrchu vyrobené součásti. Vzdáleností trysky od tvořeného povrchu také ovlivňujeme samotnou přilnavost jednotlivých vrstev. Příliš velká vzdálenost může mít za následek odlepování materiálu od podložky, naopak příliš malá vzdálenost může zapříčinit ucpání vytlačovací trysky.
- *průměr trysky*: důležitým parametrem ovlivňujícím přesnost tisku, který musíme respektovat je průměr použité trysky. Zejména při návrhu tenkostěnných nádob a jemných detailů kdy je vhodné volit menší průměry,
- *velikost modelu*: Některé tiskové materiály mají velkou tendenci ke kroucení vlivem výrazné změny objemu v závislosti na teplotě (velká tepelná roztažnost materiálu). Čím větší je tedy tištěný objekt, tím větší vnitřní pnutí vinou smršťování materiálu vzniká, a tomu odpovídající kroucení,
- *tisková rychlost*: při tištění malých rozměrů a jemných detailů musíme dbát na správnou tiskovou rychlost. Příliš vysoká rychlost může zapříčinit to, že se předešlé vrstvy materiálu nestihnou dostatečně ochlazovat a může tak dojít k deformaci objektu,
- *doba chlazení*: vliv na konečnou strukturu,
- *generování G-kodů*: U rozdílných slicer programů můžeme upozorovat rozdílný postup tvorby tiskových drah a to do jisté míry může ovlivňovat výslednou kvalitu,
- *použitý slicer software*: zásadní roli v přesnosti a kvalitě tisku je, nastavení použitého sliceru, aby u tisku malých vrstev počkal tisk, až materiál předchozí vrstvy zchladne. Teplý materiál má větší objem a tryska jej v další vrstvě poškozuje opětovným nahříváním.

Za nejpresnější metodu aditivní výroby je považována stereolitografie. Kde je model vytvořen postupným vytvrzováním fotopolymery (plastická hmota citlivá na světlo) pomocí UV laseru. V následující kapitole však bude proveden experiment na zkoumání a hodnocení přesnosti tisku za pomoci FDM aditivní technologie (viz kap. 3).

5. EXPERIMENT

Pro zpracování praktické části bakalářské práce byl navržen experiment, který může sloužit jako rychlý, jednoduchý a levný způsob, jak si mohou uživatelé stolních tiskáren otestovat, ověřit či seřadit svou vlastní stolní 3D tiskárnu. K experimentu byla použita stolní 3D tiskárna pracující s FFF technologií (viz kap. 3.) Felix 3.0, kterou vlastní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

Princip experimentu je založen na tisku testovacích modelů (obr. 8), na jejichž konstrukci se hodnotí specifické výkonové charakteristiky a pohybové systémy stolních FFF/FDM 3D tiskáren. [9]



Obr. 8: Testovací modely [9]

5.1 Proces tvorby testovacího modelu

Tato kapitola je především zaměřena na obecný postup tvorby 3D modelu, na seznámení se se základním pracovním prostředím programu Repetier-host a na vyhodnocení kvality vytištěných modelů.

CAD

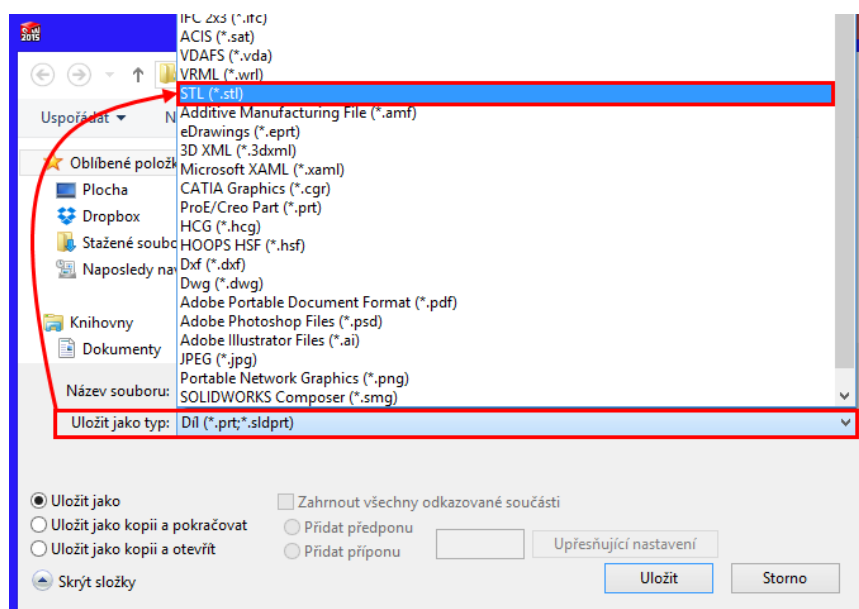
Prvním krokem pro vytvoření testovacího modelu, je jeho návrh a zkonstruování v grafickém CAD softwaru. Pro návrh testovacích modelů byla použita studentská verze SolidWorks 2015 a Autodesk Inventor Profesional 2013. Každý z těchto CAD softwarů používá vlastní datový formát:

- SolidWorks (SLDPRT),
- Autodesk Inventor (IPT).

Konvergenz STL

Formát STL, jako zkratka vycházející z technologie 3D tisku stereolitografie, byl vyvinut firmou 3D Systems. Soubor popisuje třírozměrnou povrchovou geometrii modelu a je nejčastěji používán pro export dat do 3D tiskáren z CAD softwaru nebo softwarových 3D modelářů. [27]

- v pracovním okně programu s vybraným modelem se v záložce **Soubor** zvolí položka **Uložit jako**, která spustí dialogové okno (obr. 9),
- v možnostech **Uložit jako typ** se vybere požadovaný formát souboru **STL** a příkazem **Uložit** se objekt uloží do požadovaného místa.



Obr. 9: Konverze STL

Nastavení zařízení

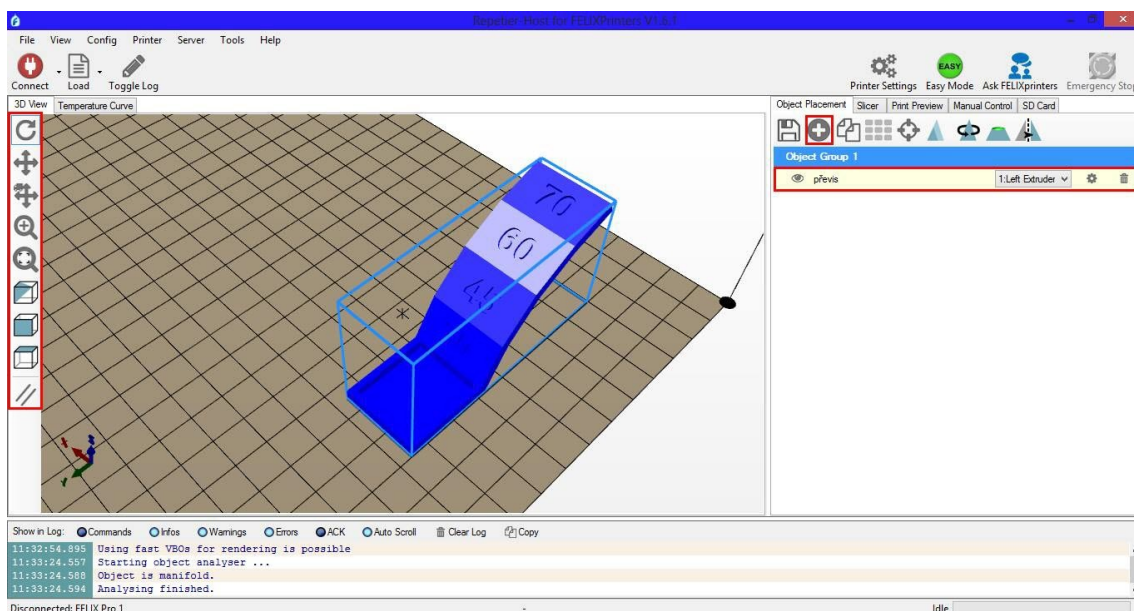
Po zpracování vytvořených modelů následuje nastavení tiskových parametrů a umístění modelů na stavební podložce prostřednictvím počítače a softwaru určeného pro danou 3D tiskárnu. Tiskárna Felix 3.0 má k dispozici software Repetier-host, který poskytuje tyto funkce:

- ovládání tiskárny, pohyb os a nastavení teplot, kalibraci a další funkce,
- zpracování CAD souboru (STL souborů) a jejich příprava pro tisk.

Repetier-host je velice jednoduchý software, nevyžadující specifické zkušenosti s jeho ovládáním. Ovládání je intuitivní a logické. Software rovněž nabízí volbu zobrazení v českém jazyce, česká mutace je prozatím poskytována pouze u některých funkcí softwaru. I přesto je jeho ovládání velice jednoduché a nápovědy či popisy funkcí v anglickém jazyce jsou snadno pochopitelné.

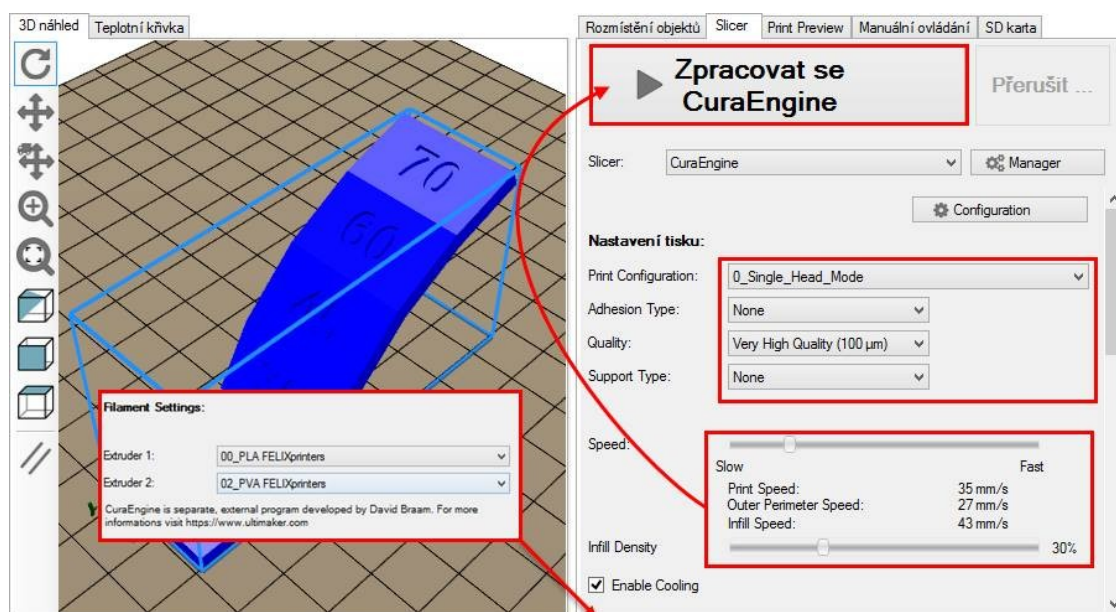
Uživatelské rozhraní programu Repetier-host (obr. 10) poskytuje digitální podobu stavební podložky 3D tiskárny. Dále obsahuje základní funkce pro práci a zobrazení modelu na pracovní ploše.

Ikonou se znaménkem plus se vloží do prostředí požadovaný soubor 3D modelu z výchozího místa uložení.



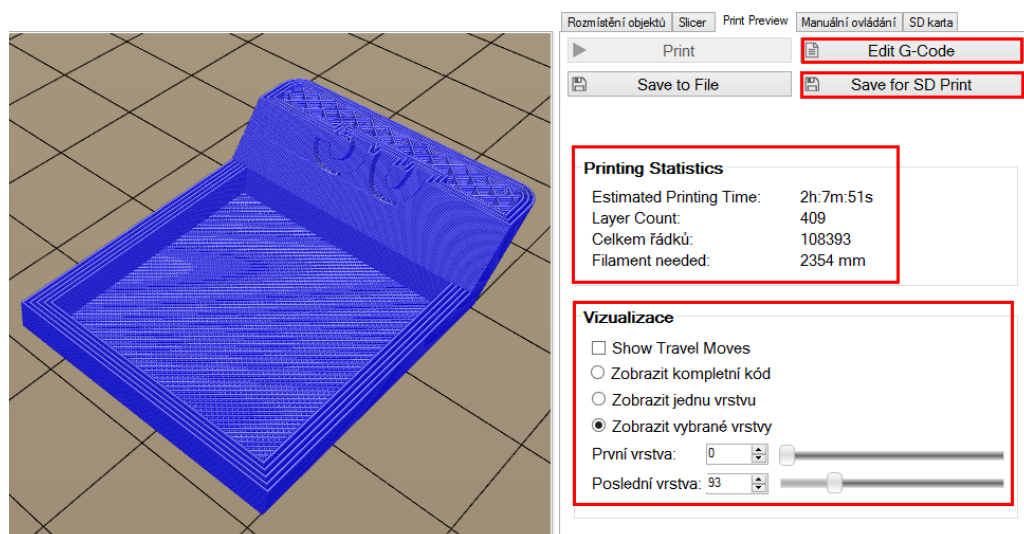
Obr. 10: Uživatelské rozhraní řešení Repetier-host

Za pomoci funkcí na levé straně pracovního okna se importovaný model ve formátu STL vhodně umístí do pracovním prostoru vůči rohovému bodu, který znázorňuje výchozí bod stroje (obr. 10). Orientace modelu je důležitá především pro dodržení zásad testování specifických vlastností tiskárny. Musí se však dbát na rozměrové vlastnosti tiskárny v souvislosti s rozměry tištěného modelu. Jakmile je model ustaven, pokračuje se nastavením v záložce **Slicer**, kde se upraví parametry tisku (obr. 11). Tato nastavení umožňují ovlivnit parametry související s kvalitou konečného modelu. V prvé řadě se volí počet tiskových hlav v procesu. Jelikož se tisknou modely z jednoho materiálu (PLA), byl zvolen tisk jednou tiskovou hlavou. Dále se zvolil typu přilnutí modelu k podložce, typ použitých podpor a tisková kvalita. Použitá stavěcí podložka vykazuje velice příznivé adhezní vlastnost, proto byla ponechána volba typu přilnutí **Žádný**. Z důvodu snahy testování vlastností tiskárny nebyly modely tištěny s podporami. Teploty extruderu a podložky byly ponechány dle základního nastavení softwaru pro PLA 190°C a 56°C pro podložku, výšku vrstvy označenou jako kvalitu tisku byla nastavena na velmi vysokou kvalitu s hodnotou tloušťky vrstvy 0,1 mm (100µm). Rychlost tisku 35 mm·s⁻¹ souvisela s vnější obvodovou rychlostí a rychlostí vyplňování, které jsou dány automaticky softwarem (vychází z rychlosti tisku). Hustota výplně je dalším volitelným parametrem, který se běžně volí okolo 20 – 30 % (0 % – duté objekty, 100 % – plné objekty).



Obr. 11: Nastavení základních parametrů tisku

Po nastavení parametrů 3D tisku se tlačítkem **Zpracovat se CuraEngine** zpracuje simulace tisku. Software automaticky vypočítá a zobrazí informace týkající se doby tisku, počtu vrstev, počtu řádků G-kódu a délky použitého vlákna materiálu (obr. 12).



Obr. 12: Náhled před tiskem

V záložce **Vizualizace** se přepíná zobrazení celého modelu nebo jednotlivých průřezů modelu pomocí posuvníků (obr. 12).

Před samotným vytištěním modelu je nezbytné, aby aplikace provedla rozdělení modelu na tiskové vrstvy a spočítala tiskové dráhy jak pro tisk samotného obrysu modelu, tak pro vnitřní výplně a podpurné konstrukce. Výsledkem tohoto zpracování je G kód, tedy posloupnost příkazů pro tiskárnu (obr. 13).



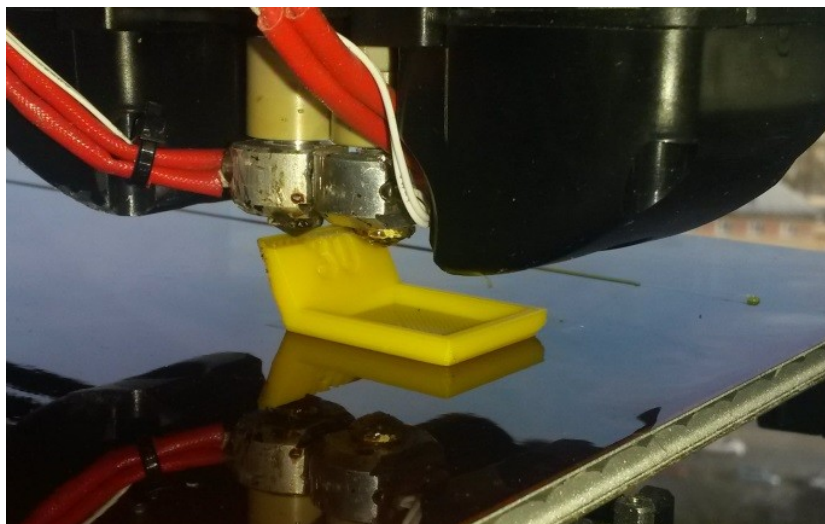
Obr. 13: Editace G kódu

Import dat do výrobního zařízení

Import dat se v případě 3D tiskárny provádí prostřednictvím SD karty s uloženým G kódem nebo síťovým kabelem.

5.2 Tisk modelů a hodnocení výsledků

Před zahájením procesu tisku je nutné provést kalibraci podložky. Pro úspěšný tisk je důležité, aby byla tisková podložka důkladně vyvážena. Vzdálenost mezi tryskou a stolem by měla být stejná v každé poloze podložky v osách X a Y. Po zapnutí přístroje a nahrání modelu z paměťové karty se zahájí vyhřívání extruderu a podložky na požadovanou teplotu. Automaticky po dosažení požadovaných teplot se zahájí samotný tisk 3D modelu (obr. 14).

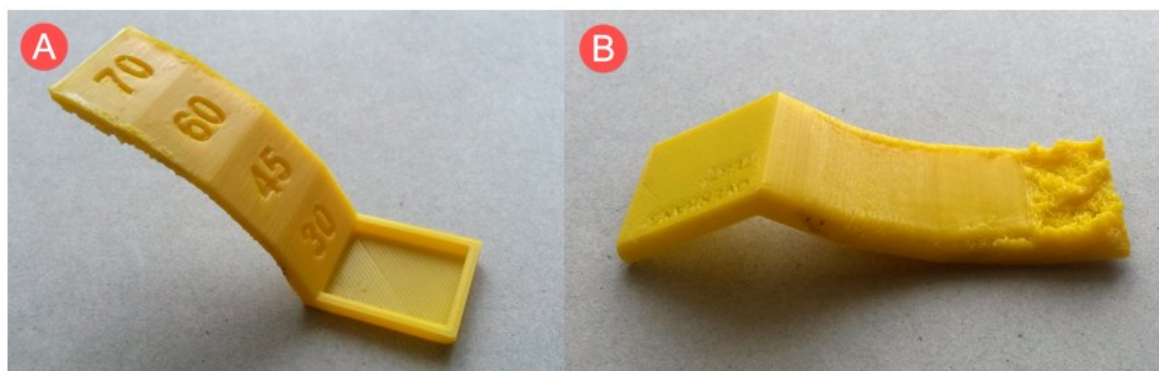


Obr. 14: Průběh tisku

Parametry tisku – tisková rychlost, tloušťka vrstvy, hustota výplně, teplota extruderu a teplota podložky byly zvoleny převážně u všech testovacích modelů stejně. Modely jsou tištěny z materiálu PLA (viz kap. 1.2) při pokojové teplotě 23 °C.

Přepis

Tiskem modelu (obr. 15) se zjistí, pod jakým úhlem je tiskárna schopna tisknout bez použití podpor. Model je navržen se čtyřmi stupni sklonu: 30°, 45°, 60°, 70°. Schopnost tiskáren tisknout bez použití podpor je velkým přínosem pro výslednou strukturu povrchu modelu a odpadá tím také jejich náročné odstraňování. Tiskové parametry modelu Přepis jsou uvedeny v tab. 6.



Obr. 15: Přepis, A – přední část, B – zadní část

Tab. 6: Tiskové parametry – Přepis

Parametry	Hodnota	Jednotky
Doba tisku	127	min
Počet vrstev	409	-
Spotřeba materiálu	2354	mm
Tisková rychlost	35	mm·s ⁻¹
Tloušťka vrstvy	0,1	mm
Hustota výplně	30	%
Teplota extruderu	190	°C
Teplota podložky	56	°C

Hodnocení:

Při tisku tohoto modelu 3D tiskárna vytiskla všechny stupně převisu. Docházelo však k hrnutí a deformaci materiálu vytlačovací tryskou což zapříčinilo horší kvalitu povrchu zadní části modelu a částečnou deformaci v okrajových oblastech v rozmezí (30–60)°. Při tisku největšího sklonu 70 ° se nepodařilo vytvořit pevný základ pro tisk, tudíž lze zpozorovat částečné prověšení vytlačovaného materiálu. Lze tedy říci, že při nastavených parametrech tisku (viz tab. 6) nedocílíme dokonalého tvaru a povrchu tištěného modelu. Možným řešením je snížení tiskové rychlosti a teploty podložky pro dosažení lepšího chladnutí nanesených vrstev materiálu.

Rozměrová přesnost

Důležitým faktorem pro vytváření co nejvěrnějších modelů či prototypů podobajících se originálu je jejich rozměrová přesnost. Na vytvořeném objektu (obr. 16), který se skládá z válcových stupínků o různých průměrech, lze měřením pozorovat odchylky rozměrů od zadaných parametrů v osách X, Y a Z pomocí posuvného měřidla. Tiskové parametry modelu Rozměrová přesnost jsou uvedeny v tab. 7.



Obr. 16: Rozměrová přesnost

Tab. 7: Tiskové parametry – Rozměrová přesnost

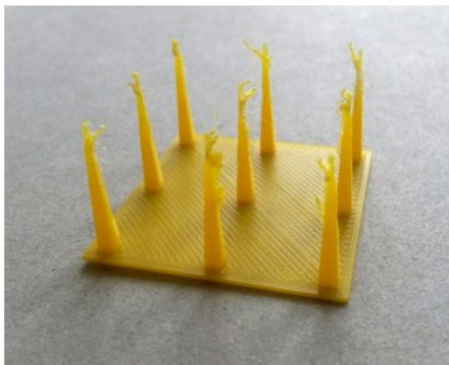
Parametry	Hodnota	Jednotky
Doba tisku	60	min
Počet vrstev	301	-
Spotřeba materiálu	1102	mm
Tisková rychlost	35	mm·s ⁻¹
Tloušťka vrstvy	0,1	mm
Hustota výplně	30	%
Teplota extruderu	190	°C
Teplota podložky	56	°C

Hodnocení:

Model se skládá z šesti válcových stupínků zadané výšky s měnicími se průměry od největšího 25 mm po nejmenší 2,5 mm. Vytisknutý model vykazuje opticky hladký přesný povrch. U menších průměrů však dochází ke kroucení a deformacím nanášených vrstev, zapříčiněné příliš vysokou obvodovou rychlostí a nedostatkem času na chladnutí nanášených vrstev. Teplotní roztažnost materiálu je hlavním faktorem ovlivňujícím změny objemu při chladnutí, tudíž je nutné počítat se smrštěním materiálu již při návrhu modelu. Nejčastěji volíme navýšení okolo 1%. Naměřené tolerance tištěného modelu se pohybují v rozmezí 0,1 mm až 0,25 mm v osách X a Y; v ose Z okolo 0,1 mm – viz kapitola 6. Měření výrobní přesnosti tištěných modelů.

Prostorové výkonové vlastnosti

Model na obr. 17 znázorňuje, jak přesná je prostorová navigace 3D tiskárny, zda si poradí s tiskem více objektů naráz a dokáže-li při tisku každé nové vrstvy dokonale navázat na vrstvu předešlou u každého z modelů. Můžeme tak říci, že je to model určený pro zjišťování schopnosti reprodukovat více předmětů naráz ve stejné kvalitě při jednou tiskovém procesu. Tiskové parametry jsou uvedeny v tab. 8.



Obr. 17: Prostorové výkonové vlastnosti

Tab. 8: Tiskové parametry – Prostorové výkonové vlastnosti

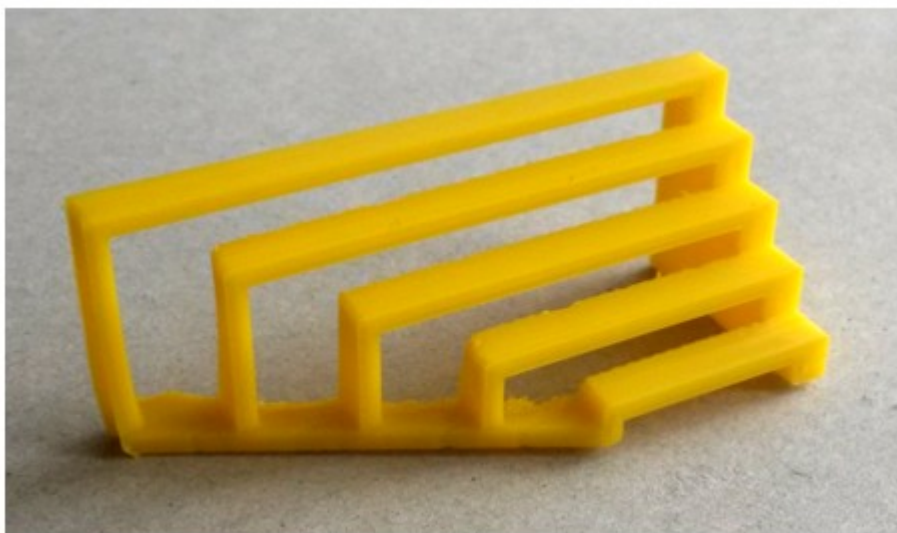
Parametry	Hodnota	Jednotky
Doba tisku	44	min
Počet vrstev	197	-
Spotřeba materiálu	635	mm
Tisková rychlost	35	mm·s ⁻¹
Tloušťka vrstvy	0,1	mm
Hustota výplně	30	%
Teplota extruderu	190	°C
Teplota podložky	56	°C

Hodnocení:

Na tomto modelu můžeme mj. upozorovat i další užitečné vlastnosti, jako je přilnavost podložky nebo vliv teploty na kroucení tenkých a plochých objektů. Hlavní ukazatelem je však schopnost přesné navigace vytlačovací trysky. Zpozorovat lze všech 9 hrotů vytištěných poměrně přesně. Zřetelné jsou však vady na hrotech jehlanů, kde příliš velká obvodová rychlost tisku způsobila, že se materiál nestihl dostatečně ochlazovat. Docházelo tedy k částečné deformaci a tažení vláken materiálu tryskou. Možné řešení je snížit tiskové rychlosti u částí, které jsou příliš tenké a vysoké, aby se spojované vlákna dokázali dostatečně rychle ochladit a nevznikali tak následné deformace. Uvažovat by šlo i o odjetí trysky, setrvání do doby, než se vrstva ochladí a opětovné nanesení materiálu.

Přemostění

Při snaze tisku bez podpor se nevyhneme objektům obsahující části, které překlenují určitou vzdálenost. Tento model poskytuje představu o tom, do jaké vzdálenosti je 3D tiskárna schopna vytvořit překlenutou část bez použití podpor (obr. 18). Tiskové parametry modelu Přemostění jsou uvedeny v tab. 9.



Obr. 18: Přemostění

Tab. 9: Tiskové parametry – Přemostění

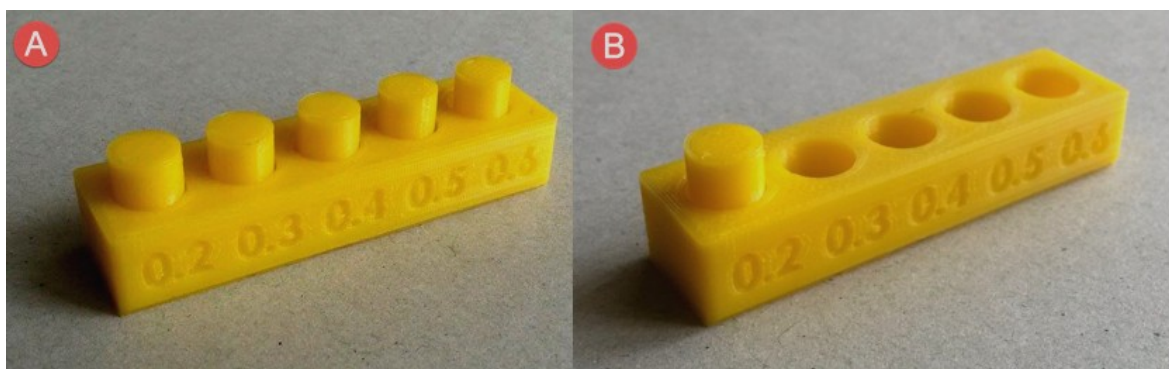
Parametry	Hodnota	Jednotky
Doba tisku	43	min
Počet vrstev	126	-
Spotřeba materiálu	1610	mm
Tisková rychlost	30	mm·s ⁻¹
Tloušťka vrstvy	0,2	mm
Hustota výplně	20	%
Teplota extruderu	190	°C
Teplota podložky	56	°C

Hodnocení:

Pro zjištění vzdálenosti, kterou je tiskárna schopna překlenout bez použití podpor používáme jednoduchý model, skládající se z pěti můstků různých délek. Tiskárna byla schopna sestavit všech pět můstků s jistými obtížemi. U všech lze pozorovat prověšení spodní vrstvy materiálu a změnu rozměrů. Nejlepší výsledky tisku prokazuje nejkratší můstek přesahující vzdálenost 20 mm. Lze tady konstatovat, že je tiskárna schopna tvořit překlenuté části kratší jak 20 mm bez větších potíží.

Tolerance děr

Jednou z užitečných vlastností technologie Rapid Prototyping je také tvorba funkčních, pohyblivých částí. Lze tedy předpokládat, že se při návrhu modelu setkáme s částmi, jako jsou například, klouby, čepy, spojovací články a mnoho dalších. Také se však snažíme tvořit co nejvěrnější aproximaci originálního dílu, ve kterém se mohou objevovat prvky, jako například otvory pro šrouby. Tímto modelem (obr. 19) se snažíme zjistit, jak velkou mezeru mezi tištěnými modely můžeme tvořit, aby nám nevzniklo trvalé spojení nataveného materiálu ještě před vychladnutím. Tiskové parametry jsou uvedeny v tab. 10.



Obr. 19: Tolerance děr

Tab. 10: Tiskové parametry – Tolerance děr

Parametry	Hodnota	Jednotky
Doba tisku	97	min
Počet vrstev	151	-
Spotřeba materiálu	2427	mm
Tisková rychlost	35	mm·s ⁻¹
Tloušťka vrstvy	0,1	mm
Hustota výplně	30	%
Teplota extruderu	190	°C
Teplota podložky	56	°C

Hodnocení:

Jednoduchá konstrukce modelu obsahuje 5 děr stejného průměru a 5 kolíků různých průměrů odstupňovaných dle požadované tolerance 0,2 až 0,6 mm (obr. 19). Test spočívá ve vytištění celé sestavy – tělesa s kolíky – v jednom tiskovém procesu. Po vytištění a odstranění soustavy z pracovní podložky bylo zjištěno, že lze některé kolíky snadno vyjmout z otvoru bez použití nářadí. Experiment ukázal, že kolík s nejmenší tolerancí 0,2 mm nelze vyjmout, z čeho lze konstatovat, že je 3D tiskárna schopna tisknout součásti s vůlí, jejíž tolerance je vyšší než 0,3 mm.

Z rezonance

Model na obr. 20 pomůže zjistit nedostatky tištění tenkostěnných vysokých součástí – kvalita tisku v ose Z. Charakteristické chyby při tisku takových součástí jsou kroucení, změna průřezu modelu, borcení nebo také nerovnoměrné nanášení materiálu. Tiskové parametry jsou uvedeny v tab. 11.



Obr. 20: Z rezonance

Tab. 11: Tiskové parametry – Z rezonance

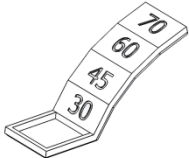
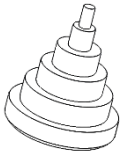
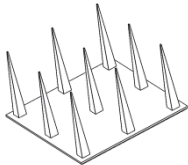
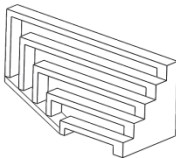
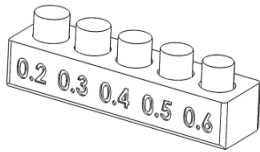

Parametry	Hodnota	Jednotky
Doba tisku	249	min
Počet vrstev	1511	-
Spotřeba materiálu	2096	mm
Tisková rychlost	35	mm·s ⁻¹
Tloušťka vrstvy	0,1	mm
Hustota výplně	30	%
Teplota extruderu	190	°C
Teplota podložky	56	°C

Hodnocení:

Na modelu nebyly shledány viditelné poruchy tisku. Změny průměru modelu byly změřeny posuvným měřidlem na třech zvolených místech. Hodnoty měření se liší v řádu několika setin milimetru. Výška součásti je však nižší o 0,3 mm v porovnání s CAD modelem – viz kapitola 6. Měření výrobní přesnosti tištěných modelů.

Celkové stručné porovnání tištěných modelů, doby jejich tisku, účelu a jejich přínosu pro hodnocení tiskárny Felix 3.0 je zobrazeno v následující tabulce 12.

Tab. 12: Srovnání tištěných modelů na tiskárně Felix 3.0

	Doba tisku (min)	Účel modelu	Hodnocení Felix 3.0 (PLA)
	127	zjistit pod jakým úhlem je tiskárna schopna tisknout bez použití podpor	úhel 70°: nežádoucí prověšení materiálu, 45° a 60°: mírná deformace okrajů
	60	indikace nepřesností tisku od zadaných parametrů	odchylka od požadovaných rozměrů 0,1-0,4 mm, deformace menších průměrů
	44	zjistit přesnost prostorové navigace při tištění více objektů zároveň	dobrá návaznost vrstev, deformace špiček nedostatkem času na ochlazení vrstvy materiálu
	76	určit maximální možnou vzdálenosti překlenutí bez použití tisku podpor	viditelné prověšení spodních vrstev každého mostu, nejlepší výsledky u nejkratšího mostu
	97	zjistit v jaké toleranci mohou být součástky tištěny v bezprostřední blízkosti	kolíky s tolerancí 0,3-0,6 lze snadno bez použití nářadí vyjmout
	249	zjistit nedostatky tištění v ose Z	bezproblémový tisk, nezjištěny závažné nedostatky

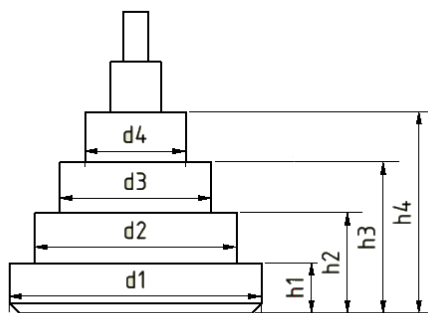
6. MĚŘENÍ VÝROBNÍ PŘESNOSTI TIŠTĚNÝCH MODELŮ

Měření průměrných aritmetických úchylek geometrických parametrů testovacích modelů bylo provedeno dle normy „ČSN EN ISO 4287 — Geometrické požadavky na výrobky“ prostřednictvím posuvného měřidla s přesností 0,02 mm.

Pro usnadnění orientace byly hodnoty měření a veškeré výpočty související se zjišťováním aritmetické úchlky v této kapitole uvedeny pouze pro jeden případ testovacího modelu. Zbývající případy byly zpracovány v tabulkovém procesoru Microsoft Exel 2007 v příloze A a zjištěné hodnoty úchylek, zaznamenány v přehledných tabulkách pro každý měřený model.

Příklad měření parametrů na modelu Rozměrová přesnost

Měřené rozměry modelu Rozměrová přesnost jsou znázorněny na obr. 21.



Obr. 21: Měřené rozměry modelu Rozměrová přesnost

Naměřené hodnoty – průměry a výšky výstupků – modelu Převís jsou uvedeny v tab. 13 a 14. Naměřené hodnoty zbývajících modelů jsou uvedeny v Příloze A.

Tab. 13: Naměřené hodnoty parametrů průměrů d_i

č. m. (n)/parametr	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_3 [mm]	d_4 [mm]
1.	24,78	9,76	14,78	9,78
2.	24,72	9,90	14,72	9,74
3.	24,76	9,78	14,76	9,68
4.	24,74	9,86	14,70	9,78
5.	24,77	9,92	14,72	9,78
Σ	123,77	9,22	73,68	48,76
Aritmetický průměr	24,754	9,844	14,736	9,752

Tab. 14: Naměřené hodnoty parametrů výšky h_i

č. m. (n)/parametr	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]
1.	5,14	10,10	15,16	20,10
2.	5,20	10,20	15,18	20,08
3.	5,16	10,18	15,18	20,08
4.	5,18	10,18	15,16	20,10
5.	5,18	10,20	15,18	20,12
Σ	25,86	50,86	75,86	100,48
Aritmetický průměr	5,172	10,172	15,172	20,096

Vzor výpočtu výběrového průměru a směrodatné odchylky parametrů modelu
Rozměrová přesnost:

a) Výběrový průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

Parametr průměru d_l

$$\bar{x}_{d1} = \frac{1}{5} \cdot 123,77 \quad (6.2)$$

$$\bar{x}_{d1} = 24,754 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Parametr výšky h_l

$$\bar{x}_{h1} = \frac{1}{5} \cdot 25,86 \quad (6.4)$$

$$\bar{x}_{h1} = 5,172 \text{ mm} \quad (6.5)$$

b) Výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.6)$$

Parametr průměru d_l

$$\Delta_{d11} = (d_{11} - \bar{x}_d)^2 = (24,78 - 24,754)^2 = 0,000676 \text{ mm}^2 \quad (6.7)$$

$$\Delta_{d12} = (d_{12} - \bar{x}_d)^2 = (24,72 - 24,754)^2 = 0,001156 \text{ mm}^2 \quad (6.8)$$

$$\Delta_{d13} = (d_{13} - \bar{x}_d)^2 = (24,76 - 24,754)^2 = 0,000036 \text{ mm}^2 \quad (6.9)$$

$$\Delta_{d14} = (d_{14} - \bar{x}_d)^2 = (24,74 - 24,754)^2 = 0,000196 \text{ mm}^2 \quad (6.10)$$

$$\Delta_{d15} = (d_{15} - \bar{x}_d)^2 = (24,77 - 24,754)^2 = 0,000256 \text{ mm}^2 \quad (6.11)$$

Parametr výšky h_l

$$\Delta_{h11} = (h_{11} - \bar{x}_h)^2 = (5,14 - 5,172)^2 = 0,001024 \text{ mm}^2 \quad (6.12)$$

$$\Delta_{h12} = (h_{12} - \bar{x}_h)^2 = (5,20 - 5,172)^2 = 0,000784 \text{ mm}^2 \quad (6.13)$$

$$\Delta_{h13} = (h_{13} - \bar{x}_h)^2 = (5,16 - 5,172)^2 = 0,000144 \text{ mm}^2 \quad (6.14)$$

$$\Delta_{h14} = (h_{14} - \bar{x}_h)^2 = (5,18 - 5,172)^2 = 0,000064 \text{ mm}^2 \quad (6.15)$$

$$\Delta_{h15} = (h_{15} - \bar{x}_h)^2 = (5,18 - 5,172)^2 = 0,000064 \text{ mm}^2 \quad (6.16)$$

Rozdíly naměřených a průměrových hodnot jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15: Rozdíl naměřené a průměrné hodnoty

č. měření (n)/parametr	Δd [mm]	Δh [mm]
1.	0,000676	0,001024
2.	0,001156	0,000784
3.	0,000036	0,000144
4.	0,000196	0,000064
5.	0,000256	0,000064
Σ	0,00232	0,00208

Parametr průměru d_l

$$s_{d1} = \sqrt{\frac{0,00232}{4}} \quad (6.17)$$

$$s_{d1} = 0,024083 \text{ mm} \quad (6.18)$$

Parametr výšky h_l

$$s_{h1} = \sqrt{\frac{0,00208}{4}} \quad (6.19)$$

$$s_{h1} = 0,022804 \text{ mm} \quad (6.20)$$

c) Směrodatná odchylka dílčích aritmetických průměrů

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (6.21)$$

Parametr průměru d_l

$$s_{(\bar{d1})} = \frac{0,024083}{\sqrt{5}} \quad (6.22)$$

$$s_{(\bar{d1})} = 0,01077 \text{ mm} \quad (6.23)$$

Parametr výšky h_l

$$s_{(\bar{h}_1)} = \frac{0,022804}{\sqrt{5}} \quad (6.24)$$

$$s_{(\bar{h}_1)} = 0,010198 \text{ mm} \quad (6.25)$$

d) Kombinovaná standardní nejistota

$$U_c = k \cdot U_A = k \cdot s_{(\bar{x})} \quad (6.26)$$

k – studentův koeficient pro správnost výsledku s pravděpodobností 95% a počtem měření $n=5$ je $k=2,640$

Parametr průměru d_1

$$U_{d1} = 2,640 \cdot 0,01077 \quad (6.27)$$

$$U_{d1} = 0,028434 \text{ mm} \quad (6.28)$$

Parametr výšky h_1

$$U_{h1} = 2,640 \cdot 0,010198 \quad (6.30)$$

$$U_{h1} = 0,026923 \text{ mm} \quad (6.31)$$

e) Naměřené hodnoty

Parametr průměru d_1

$$d_1 = (\bar{x}_{d1} \pm U_{d1}) \quad (6.32)$$

$$d_1 = (24,754 \pm 0,028) \text{ mm} \quad (6.33)$$

Parametr výšky h_1

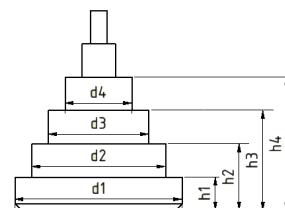
$$h_1 = \bar{x}_{h1} \pm U_{h1} \quad (6.34)$$

$$h_1 = (5,172 \pm 0,027) \text{ mm} \quad (6.35)$$

Výsledky statistického zpracování naměřených hodnot vybraných parametrů testovaných modelů včetně nejistoty měření jsou uvedeny v tab. 16 až 19.

Tab. 16: Výsledky měření parametrů modelu Rozměrová přesnost

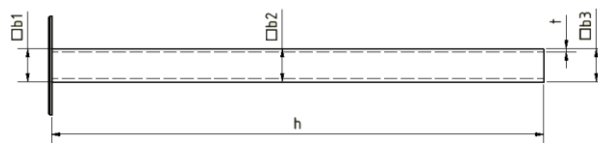
parametr	rozměr [mm]	rozměr dle CAD [mm]
d₁	(24,754 ± 0,028)	25
d₂	(19,844 ± 0,084)	20
d₃	(14,736 ± 0,039)	15
d₄	(9,752 ± 0,052)	10
h₁	(5,173 ± 0,027)	5
h₂	(10,172 ± 0,049)	10
h₃	(15,172 ± 0,013)	15
h₄	(20,096 ± 0,020)	20



Pozn.: d_i – průměry válcových částí, h_i – výšky výstupků měřené od základny.

Tab. 17: Výsledky měření parametrů modelu Z rezonance

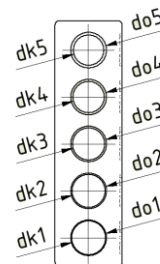
parametr	rozměr [mm]	rozměr dle CAD [mm]
b₁	(9,988 ± 0,013)	10
b₂	(9,932 ± 0,049)	10
b₃	(9,856 ± 0,070)	10
h	(14,624 ± 0,051)	15
t	(1,064 ± 0,011)	1



Pozn.: b_i – průměr čtvercové části modelu ve zvolené výšce, h – výška měřené součásti, t – tloušťka stěny modelu.

Tab. 18: Výsledky měření parametrů modelu Tolerance děr

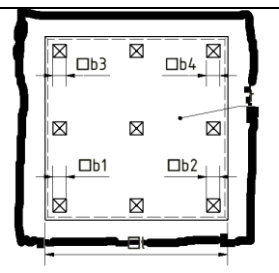
parametr	rozměr [mm]	rozměr dle CAD [mm]
d_{o1}	–	8
d_{o2}	(7,824 ± 0,056)	8
d_{o3}	(7,920 ± 0,067)	8
d_{o4}	(7,876 ± 0,026)	8
d_{o5}	(7,916 ± 0,056)	8
d_{k1}	(7,492 ± 0,054)	7,6
d_{k2}	(7,236 ± 0,026)	7,4
d_{k3}	(7,052 ± 0,027)	7,2
d_{k4}	(6,908 ± 0,013)	7,0
d_{k5}	(6,772 ± 0,021)	6,8



Pozn.: d_{o_i} – průměry otvorů, d_{k_i} – průměry kolíků.

Tab. 19: Výsledky měření parametrů modelu Prostorové výkonové vlastnosti

parametr	rozměr [mm]	rozměr dle CAD [mm]
b₁	(2,548 ± 0,021)	2,5
b₂	(2,552 ± 0,013)	2,5
b₃	(2,556 ± 0,026)	2,5
b₄	(2,560 ± 0,017)	2,5
l	(34,784 ± 0,020)	35,0
t	(0,912 ± 0,036)	1,0



Pozn.: b_i – průměr vybraných hranolů v kořenové části, l – délka hrany čtvercové podstavy, t – tloušťka podstavy.

Hodnocení stolní 3D tiskárny Felix 3.0

3D tiskárna Felix 3.0 patří mezi stolní tiskárny pracující s FFF technologií (obr. 21). Jednoduchá konstrukce z hliníkových profilů z ní dělá velice jednoduchý a přenosný, univerzální nástroj vhodný pro začínající i pokročilé uživatele 3D tiskáren. Její univerzální použití osloví i pokročilé uživatele, kteří si naleznou zálibu v testování nespočtu druhů materiálů. Doprovodný software je velice jednoduchý a intuitivní. Kvalita vytištěných modelů překvapí svou dobrou povrchovou úpravou, vykazuje však i jisté nedostatky s rozměrovou přesností tisku. Tyto nedostatky mohou být spjaté s její konstrukcí a také s méně kvalitním Slicerem, který zajišťuje rozdělení objektu na vrstvy a plánování drah tiskové hlavy.



Obr. 21: 3D tiskárna Felix 3.0

Klady a zápory tiskárny Felix 3.0:

- + jednoduché, pohodlné uvedení do provozu,
- + přímočarý software pro přípravu tisku,
- + dostatek prostoru pro tisk větších modelů,
- + širší volba materiálů (ABS, PLA, HIPS, PETG,...),
- + dobrá povrchová úprava modelů,
- + přijatelná cena,
- rezervy při tisku přemostění a převisů z PLA,
- není vhodná do kancelářské místnosti, kvůli zvýšené hlučnosti a absenci zakrytování pracovního prostoru,
- zhoršená stabilita a obtížnější kalibrace stavebního stolu,
- horší rozměrová přesnost tištěných modelů.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo přiblížit problematiku aditivní výroby, přesnosti 3D tisku polymerního materiálu PLA a využití v různých odvětvích průmyslu. V dnešní době jde o velmi rychle rostoucí a rozvíjející se technologii. Technologie se v České republice postupně rozvíjí a podrobné informace o technologiích jsou dostupné zpravidla ze zahraničních zdrojů. Této problematice se věnuje mnoho amatérských nadšenců, ale také mnoho odborníků. Je to zajímavý směr, který umožňuje všem okruhům populace zkoumat nové technologie, aniž by bylo zapotřebí nákladných investic.

Teoretická část bakalářské práce se zabývá objasněním pojmu aditivní výroba. Dále se zabývá materiály využívanými v procesu tvorby 3D modelů, především polymerními materiály, které se v dnešní době využívají ve velké míře u běžných uživatelů stolních 3D tiskáren, jejich vlastnostmi a tiskovými parametry. Následující část byla věnována stručnému náhledu k vybraným technologiím, řadících se mezi tři základní typy výrobního procesu.

Praktická část bakalářské práce zabývala problematikou přesnosti a především testováním přesnosti tisku na 3D tiskárně Felix 3.0. Výstupem práce jsou modely, umožňující testování výkonových charakteristik a přesnost stolních 3D tiskáren běžnými uživateli při nízkých nákladech, jednoduchosti a rychlosti tisku. 3D tiskárna Felix 3.0 pracuje na principu metody FFF a díky dvěma tryskám je schopna tisknout dvěma barvami modely s maximálními rozměry podstavy (255 x 205) mm a výšce 220 mm. Objekty je možné tisknout s výškou vrstvy v ose Z od 0,05 mm. Umožňuje tisk materiálů ABS-C, ABS, PLA, PVA, PETG, FLEX, WOOD, HIPS a mnoho dalších.

Ověření funkčnosti tiskárny bylo provedeno na zkušebních výtiscích, na kterých byla zkoumána rozměrová přesnost tisku, tisk převisů, přemostění, tolerance děr, prostorová navigace a deformace v ose Z. Přesnost tisku se u měřených dílů pohybuje v závislosti na nastavených parametrech v řádu desetin milimetru se slušnými výsledky povrchové úpravy, avšak rozměrová přesnost tisku se setkává s nedostatky, které výrazně ovlivňují konečný rozměr výrobku. Je tedy nutno při návrhu objektů počítat s odchylkou rozměrů v řádu desetin milimetru. Co se týče prvků přemostění a převisů, bylo prakticky ověřeno, že je problém tisknout modely se sklonem stěny 70° vůči podložce, kde docházelo k prověšení vláken materiálu s částečnou deformací v okrajových oblastech celého modelu. U přemostění bylo dosaženo přijatelných výsledků u vzdáleností menších než 20 mm. Je tedy zřejmé, že pro dosažení lepších výsledků je nutno použít podpor což přidá práci s jejich náročným odstraňováním a povrchovými úpravami.

U tisku modelu pro zkoumání tolerancí děr byla limitující pouze hodnota tolerance 0,2 mm. Prostorová navigace této tiskárny se prokázala jako dostačující a nebyly zjištěny závažné problémy. Pozitivně dopadl i tisk tenkostěnných vysokých součástí v ose Z.

Tiskárna Felix 3.0 se prokázala jako velice dobrý univerzální přístroj pro začátečníky, avšak její horší rozměrová přesnost ji snižuje užitnou hodnotu pro profesionální využití. Ovládací software tiskárny je velice jednoduchý a přímočarý. Nevýhodou je relativně složitá kalibrace tiskového stolu chybějící adaptivní nastavování tiskové rychlosti, což se projevilo u menších rozměrů tisku modelu a chybějící zakrytování pracovního prostoru. Tiskárna Felix 3.0 je velmi užitečný, mobilní a univerzální nástroj pro domácí uživatele s velice příjemnými avšak méně přesnými výsledky.

Děkuji Ing. Marku Pagáčovi, Ph.D., z katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TU Ostrava za odborné vedení, poskytování cenných rad a věnovaný čas při konzultacích. Jeho zkušenosti a rady byly cenným podkladem pro vypracování mé bakalářské práce a tvorbě testovacích modelů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Aditivní technologie, Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍRENSTVÍ, o.s., Josef Hodek
- [2] GIBSON, Ian a David W. ROSEN. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* [online]. New York: Springer, c2010 [cit. 2016-02-08]. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [3] Rapid prototyping. *Innomia* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/rapid-prototyping>
- [4] FORNEA, Dumitru. *Žít zitrkem. 3D tisk jako nástroj k posílení evropského hospodářství.* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.eesc.europa.eu/?i=portal.en.ccmi-opinions.32834>
- [5] Additive Manufacturing Manufacturers links - Classification by Technology. *IDS* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: http://rds077.blogspot.cz/2015/11/additive-manufacturing-manufacturers_26.html
- [6] Additive fabrication. *CUSTOMPART.NET* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [7] 3D tiskové materiály – doporučené nastavení. *3d tiskárny* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/3d-tiskove-materialy-doporucena-nastaveni/>
- [8] *E-Mole.cz: speciál o 3D tisku* [online]. 2015, 1(3-4) [cit. 2016-02-22]. ISSN 2336-5714. Dostupné z: http://www.e-mole.cz/sites/default/files/media/documents/e-mole_003-004-2015-mobile.pdf
- [9] Make: 2015 3D Printer Shoot Out Test Models. *Thingiverse* [online]. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.thingiverse.com/thing:533472>
- [10] Materiály tisku. *3D TISK* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://3dtisk1.webnode.cz/material-tisku/>
- [11] Printing with nylon. *MatterHackers* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/printing-with-nylon>
- [12] ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES. *UNIVERSITY OF TWENTE* [online]. 2015 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: https://www.utwente.nl/ctw/opm/research/design_engineering/rm/Additive%20Manufacturing/overview-of-additive-manufacturing-processes/

- [13] About Additive Manufacturing. *Loughborough University* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive/manufacturing/materialextrusion/>
- [14] STUCKER, Brent. *Additive manufacturing technologies* [online]. University of Louisville [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.naefrontiers.org/File.aspx?id=31004>
- [15] Indirect processes. *Additively* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/indirect-processes#read-advantages>
- [16] Polyjet. *ME3261* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://blog.nus.edu.sg/u0804594/common-rp-techniques/e-polyjet/>
- [17] Direct and Binder 3D Printing techniques. *3D printing from scratch* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/direct-and-binder-3d-printing-techniques/>
- [18] Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenčni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [19] EIJK, C. *Metal Printing Process: Development of a New Rapid Manufacturing Process for Metal Parts* [online]. Norway, 2004 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.sintef.no/globalassets/upload/materialer_kjemi/metallurgi/prosess/pm2004.pdf
- [20] Plastic Jet Printing – PJP. *Buy 3D printer* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.buy3dprinter.org/3dprintingtechnologies/plastic-jet-printing-pjp/>
- [21] SLA vs. PolyJet. *Trimech* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://blog.trimech.com/sla-vs-polyjet-technology-review>
- [22] FEDOROVICH, N.E. *3D-Fiber Deposition for Tissue Engineering and Organ Printing Applications* [online]. Netherlands: Springer, 2010 [cit. 2016-04-15]. ISBN 978-90-481-9145-1. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9145-1_13
- [23] OLEJARCZYK, Michal. *Additive manufacturing- factory on your own desk* [online]. Poland [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.best.wroclaw.pl/autumn14/wp-content/uploads/2014/06/Factory-on-your-own-desk-Rapid-Prototyping.pdf>. Wroclaw University of Technology.
- [24] WASP's Ceramic 3D Printing Abilities. *3d printing industry* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2016/01/26/artist-francesco-pacelli-shows-off-wasps-ceramic-3d-printing-abilities/>

- [25] Liquid deposit modeling. *3D print* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://3dprint.com/82963/ldm-wasp-extruder-ceramics/>
- [26] DUMITRIU, Severian. *Polymeric Biomaterials* [online]. Florida: CRC Press, 2013, s. 516 [cit. 2016-04-16]. ISBN 978-1-4200-9468-8. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=eTxmjZFU6nAC&pg=PA516&lpg=PA516&dq=3D+bioplotting&source=bl&ots=ViconFMv2D&sig=6SwNAqt44eI65WA6TTbV6tgQxSE&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwj29qLO3pLMAhWIWBoKHedwBSY4FBD0AQgvMAI#v=onepage&q=3D%20bioplotting&f=false>
- [27] STL. *3D-tisk* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/stl/>
- [28] Softwarový vývoj. *Prusa Research* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/volna-mista/>
- [29] ASA Thermoplastic. *Stratasys* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?releaseid=869599>
- [30] Printing Polypropylene (PP). *3D HUBS* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/talk/thread/printing-polypropylene-pp-sticking-issues>
- [31] Průhledný tiskový materiál umí odolat vysokému zatížení. *3d-tisk* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/pruhledny-tiskovy-material-umi-odolat-vysokemu-zatizeni/>
- [32] Polyoxymethylen (Acetal) POM. *Habasit* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.habasit.com/en/materials.htm>
- [33] Tiskové struny 1,75 mm. *Svět 3D tisku* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://eshop.svet-3d-tisku.cz/tiskove-struny-1-75-mm/>
- [34] Micro-and Bio-Rapid Prototyping Using Drop-On-Demand 3D Printing. NEE, Andrew Y. C. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* [online]. London: Springer London, 2015, s. 25688-2569 [cit. 2016-04-26]. ISBN 978-1-4471-4670-4. Dostupné z: <http://smart-torrent.com/handbook-of-manufacturing-engineering-and-technology-2015th-edition-prg-pdf-tf5028566.html>
- [35] Stratasys FrameWorx. *SMG3D* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.smg3d.co.uk/stratasys_frameworkx
- [36] Biomedical Engineering Reference. *What-when-how* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://what-when-how.com/Tutorial/topic-32dn/Biologically-Responsive-Biomaterials-for-Tissue-Engineering-220.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Technologie nástřiku pojiva [13]</i>	21
<i>Obr. 2: Technologie tryskání materiálu [12]</i>	22
<i>Obr. 3: Technologie extruze materiálu [13]</i>	23
<i>Obr. 4: Fotopolymerizační proces [13]</i>	24
<i>Obr. 5: Spojování práškových materiálů [13]</i>	25
<i>Obr. 6: Mířené nanášení materiálu [13]</i>	26
<i>Obr. 7: Plošné vrstvení [13]</i>	26
<i>Obr. 8: Testovací modely [9]</i>	37
<i>Obr. 9: Konverze STL</i>	38
<i>Obr. 10: Repetier-host: uživatelské rozhraní</i>	39
<i>Obr. 11: Nastavení základních parametrů tisku</i>	40
<i>Obr. 12: Náhled před tiskem</i>	41
<i>Obr. 13: Editace G-kódu</i>	41
<i>Obr. 14: Průběh tisku</i>	42
<i>Obr. 15: Přepis, A - přední část, B - zadní část</i>	43
<i>Obr. 16: Rozměrová přesnost</i>	44
<i>Obr. 17: Prostorové výkonové vlastnosti</i>	45
<i>Obr. 18: Přemostění</i>	46
<i>Obr. 19: Tolerance děr</i>	47
<i>Obr. 20: Z resonance</i>	48
<i>Obr. 21: Měřené rozměry modelu Rozměrová přesnost</i>	50

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Nejpoužívanější tiskové polymerní materiály</i>	13
<i>Tab. 2: Další známé, oblíbené materiály</i>	17
<i>Tab. 3: Porovnání mechanických vlastností tištěných materiálů</i>	19
<i>Tab. 4: Shrnutí vlastností vybraných technologií aditivní výroby</i>	27
<i>Tab. 5: Vybrané typy technologií aditivní výroby</i>	28
<i>Tab. 6: Tiskové parametry – Přepis</i>	43
<i>Tab. 7: Tiskové parametry – Rozměrová přesnost</i>	44
<i>Tab. 8: Tiskové parametry – Prostorové výkonové vlastnosti</i>	45
<i>Tab. 9: Tiskové parametry – Přemostění</i>	46
<i>Tab. 10: Tiskové parametry – Tolerance děr</i>	47
<i>Tab. 11: Tiskové parametry – Z rezonance</i>	48
<i>Tab. 12: Srovnání tištěných modelů na tiskárně Felix 3.0</i>	49
<i>Tab. 13: Naměřené hodnoty parametrů průměrů d_i</i>	50
<i>Tab. 14: Naměřené hodnoty parametrů výšky h_i</i>	51
<i>Tab. 15: Rozdíl naměřené a průměrné hodnoty</i>	52
<i>Tab. 16: Výsledky měření parametrů modelu Rozměrová přesnost</i>	54
<i>Tab. 17: Výsledky měření parametrů modelu Z rezonance</i>	54
<i>Tab. 18: Výsledky měření parametrů modelu Tolerance děr</i>	54
<i>Tab. 19: Výsledky měření parametrů modelu Prostorové výkonové vlastnosti</i>	55

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Naměřené hodnoty